

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Simulace okružní křižovatky v software Witness
Roundabout Simulation by Using Software Witness

Student:

Bc. Jakub Horáček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Dorda, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Horáček**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie

Specializace: 20 Silniční doprava

Téma: **Simulace okružní křižovatky v software Witness**
Roundabout Simulation by Using Software Witness

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Cílem práce je vytvořit v software Witness simulační model okružní křižovatky a pomocí experimentů s modelem zkoumat vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku čekajících vozidel a průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním. Výsledky dosažené simulací budou porovnány s výsledky získanými výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek.

Osnova práce:

1. Úvod.
2. Teoretická východiska pro řešení práce.
3. Analýza vstupních údajů pro potřeby simulace.
4. Tvorba simulačního modelu.
5. Provedené experimenty a jejich vyhodnocení.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

MEDELSKÁ, V. a kol. *Dopravné inžinierstvo*. Bratislava: Alfa Bratislava. 1991. ISBN 80-05-00737-X.
KŮS, Z.- GLOMBÍKOVÁ V. - HALASOVÁ, A. *Simulace výrobních systémů - díl 1*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2002. ISBN 55-082-02.
Manuály k simulačnímu software Witness.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Dorda, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Děkuji vedoucímu práce Ing. Michalovi Dordovi, Ph.D. za odbornou pomoc, za věcné připomínky při vedení práce, poskytnuté materiály a ochotu při řešení problémů.

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23. 5. 2011

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomovou práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomovou práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomovou práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23. 5. 2011

.....
podpis studenta

Bc. Jakub Horáček
Na Vyhlídce 194
56301 Lanškroun

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HORÁČEK, J. Simulace okružní křižovatky v software Witness: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2011 XX s. Vedoucí práce: Dorda, M.

Obsahem práce je tvorba simulačního modelu okružní křižovatky v simulačním software Witness. V diplomové práci je proveden dopravní průzkum na konkrétní okružní křižovatce a jeho výsledky jsou použity při tvorbě simulačního modelu. V diplomové práci je popsána tvorba simulačního modelu v software Witness a validace tohoto vytvořeného modelu. Cílem práce je provést na sestaveném modelu okružní křižovatky experimenty zaměřené na zkoumání vlivu charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a na průměrné zdržení čekáním. Výsledky dosažené simulací jsou porovnány s výsledky získanými výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

HORÁČEK, J. Simulation of roundabouts in the software Witness: Master thesis. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2011 p. XX Thesis head: Dorda, M.

The thesis is to create a simulation model roundabouts in Witness simulation software. The thesis is carried out traffic surveys on specific circular intersection and its results are used to build a simulation model. The thesis describes the creation of simulation model in software, Witness and validation of the model created. The aim of thesis is done on a model drawn up by the roundabout in experiments aimed at exploring the influence of the nature of the input stream of vehicles on the average queue length of vehicles and the average delay for waiting. Results obtained by simulations are compared with results of calculations according to the methodology for calculating the capacity of round intersections.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	7
1 Úvod.....	8
2 Teoretická východiska pro řešení práce.....	9
2.1 Definice a terminologie související s okružními křižovatkami.....	9
2.2 Typy a výhody okružních křižovatek.....	10
2.2.1 Okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem.....	11
2.2.2 Miniokružní křižovatky.....	12
2.2.3 Okružní křižovatky se dvěma a více jízdními pruhy.....	14
2.3 Definice a terminologie související s modelováním systému	15
2.4 Využití, výhody a nevýhody simulací.....	16
2.5 Dopravní průzkum	17
2.6 Výpočet kapacity okružních křižovatek.....	19
2.7 Pearsonův χ^2 test dobré shody.....	24
2.8 Intervalové odhady.....	26
2.9 Rozdělení pravděpodobnosti použité v této práci	28
2.9.1 Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti $Po(\lambda)$	28
2.9.2 Exponenciální rozdělení $E(\lambda)$	29
2.9.3 Erlangovo rozdělení pravděpodobnosti $Erlang(k,\lambda)$	29
3 Analýza vstupních údajů pro potřeby simulace	31
3.1 Popis konkrétní okružní křižovatky	31
3.2 Dopravní průzkum na konkrétní křižovatce.....	32
3.3 Ověření vstupních proudů na Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti	34
3.3.1 Odhad parametru λ Poissonova rozdělení.....	34
3.3.2 Ověření vstupních proudů na Poissonova rozdělení pravděpodobnosti.....	36
3.4 Výpočet kapacity konkrétní okružní křižovatky	40
4 Tvorba simulačního modelu.....	43
4.1 Koncepce simulačního modelu	43
4.2 Struktura simulačního modelu	44
4.3 Popis programu Witness	44
4.4 Objekty, činnosti a zdroje zahrnuté v modelu.....	45
4.5 Funkce simulačního modelu	47
4.6 Verifikace a validace modelu.....	52
5 Provedené experimenty a jejich vyhodnocení.....	57
5.1 Vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty a na průměrné zdržení vozidel čekáním.....	57
5.2 Porovnání výsledků simulace s kapacitním výpočtem okružní křižovatky	62
6 Závěr	67
Seznam použité literatury.....	69
Seznam příloh	70

Seznam použitých značek a symbolů

$t_{1-\alpha/2;n-1}$ - příslušná hodnota kvantilu Studentova rozdělení

\bar{x} - průměr hodnot

ALG_e – stupeň vytížení vjezdu [%]

$D(x)$ – rozptyl rozdělení pravděpodobnosti

$E(x)$ – střední hodnota rozdělení pravděpodobnosti

$F(x)$ – distribuční funkce

$f(x)$ – hustota pravděpodobnosti

k – počet parametrů teoretického rozdělení pravděpodobnosti.

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h]

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h]

m_i - empirické četnosti,

n – rozsah statistického souboru

n – rozsah výběru,

$P(x)$ – pravděpodobnostní funkce

p_i - teoretické pravděpodobnosti.

Q_a - intenzita vozidel na výjezdu [jv/h]

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h]

Q_k - intenzita vozidel na vozovce okružního pásu [jv/h]

r – počet tříd

R – rezerva vjezdu [jv/h]

s – směrodatná odchylka

t_w – průměrná doba čekání [s]

Witness – simulační software

α – faktor α – zohledňuje geometrické poměry vjezdu [-]

1 Úvod

V této diplomové práci je vypracován simulační model okružní křižovatky v software Witness.

Cílem práce je vytvořit v software Witness simulační model okružní křižovatky a pomocí experimentů s modelem zkoumat vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním. Výsledky dosažené simulací budou porovnány s výsledky získanými výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek.

Diplomová práce obsahuje úvod do problematiky simulace, vysvětlení pojmů používaných při simulaci a základní terminologie ohledně okružních křižovatek a popis jednotlivých typů okružních křižovatek. Dále je v kapitole teoretická východiska pro řešení práce popsán teoretický postup návrhu simulačního modelu, teoretická příprava dopravního průzkumu, teoretický postup výpočtu kapacity okružní křižovatky dle metodik technických podmínek projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích. Kapitola analýza vstupních údajů pro potřeby simulace je zaměřena na popis a realizaci konkrétního dopravního průzkumu, jeho vyhodnocení a zpracování vstupních dat pro simulační model.

V kapitole tvorba simulačního modelu je popsán postup vytvoření modelu konkrétní okružní křižovatky, vysvětlen princip funkce tohoto modelu a provedena validace modelu s konkrétní okružní křižovatkou. Na tomto modelu je provedena validace porovnáním výsledku na výstupu modelu a daty získanými dopravním průzkumem.

Část diplomové práce s názvem provedené experimenty a jejich vyhodnocení se zabývá experimentováním s vytvořeným modelem. Na vytvořeném modelu jsou navrženy a provedeny experimenty pro sledování vlivů charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním. Druhý experiment se zabývá porovnáním výsledků dosažených simulací s výsledky získanými výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek.

2 Teoretická východiska pro řešení práce

Následující podkapitoly popisují teoretická východiska pro řešení a dosažení cílů diplomové práce. Jedná se především o vysvětlení definic a terminologie související s diplomovou prací. Dále je v kapitole popsána metodika dopravního průzkumu a metodika kapacitního výpočtu okružních křižovatek dle TP 135. V této kapitole je také uveden teoretický postup ověření předpokládaného rozdělení pravděpodobnosti a popis rozdělení pravděpodobnosti použitých v této práci.

2.1 Definice a terminologie související s okružními křižovatkami

V následujícím textu uvádím vysvětlení definic a terminologie související s okružními křižovatkami, jejichž znalost je pro další chápání textu klíčová.

Okružní křižovatka

Je druh úrovně křižovatky, u které je okružní jízdní pás tvořen mezikružím nebo tvarem jemu blízkým, na tomto mezikružím je silniční provoz veden jednosměrným objezdem kolem středového ostrova proti směru hodinových ručiček od vjezdu ke zvolenému výjezdu [1].

Středový ostrov

Je kruhová nebo kruhu blízká fyzická nebo optická překážka sloužící k usměrnění pohybu vozidel po okružním jízdním pásu křižovatky proti směru hodinových ručiček. Součástí středového ostrova je i prstenec, jímž se v některých případech lemuje okraj středového ostrova pro případné pojíždění například návěsovou soupravou [1].

Okružní jízdní pás křižovatky

Je jízdní pás v šířce zpevnění vozovky okolo středového ostrova (vozovka včetně zpevněných krajnic). Po jízdním páse je realizován pohyb silničních vozidel jedoucích po okružní křižovatce [1].

Vjezd

Je jízdní pruh nebo pás křižující komunikace, ze kterého je možné napojení na okružní jízdní pás okružní křižovatky [1].

Výjezd

Je jízdní pruh nebo pás křižující komunikace, kterým silniční vozidla opouštějí okružní jízdní pás okružní křižovatky [1].

Dělicí ostrůvek

Je plocha ohraničená na všech stranách fyzicky nebo opticky vůči přilehlým jízdním pruhům. Dělicí ostrůvek se umísťuje mezi protisměrnými jízdními pruhy/pásky v délce 5 - 25 m a tvoří zpomalovací (retardační) prvek před vjezdem do křižovatky. Slouží také ke zdvojení osazení svislých dopravních značek, popřípadě i jako ochranný ostrůvek pokud je využíván pro přechod pěších [1].

Vnější průměr okružní křižovatky

Je průměr kružnice, kterou lze vepsat mezi vnější stavební ohraničení okružního jízdního pásu křižovatky [1].

Vnitřní průměr okružní křižovatky

Je průměr středového ostrova (včetně případného prstence) okružní křižovatky [1].

Kapacita křižovatky

Vyjadřuje propustnost danou počtem vozidel, která mohou projet okružní křižovatkou za určitý časový úsek. Kapacita okružní křižovatky je dána kapacitami jednotlivých vjezdů okružní křižovatky [1].

2.2 Typy a výhody okružních křižovatek

Hlavní výhody, proč jsou klasické průsečné křižovatky stále častěji nahrazovány okružními křižovatkami, jsou vyjmenovány v následujících odrážkách:

- snížení jízdní rychlosti a zklidnění dopravy,
- vyšší bezpečnost silničního provozu - snížení následků dopravních nehod,
- plynulejší provoz na všech paprscích křižovatky,
- estetická úprava křižovatky a jejího okolí.

Dříve se okružní křižovatky dělily podle velikosti vnějšího průměru okružního jízdního pásu křižovatky (D) na mini okružní křižovatky (průměr $D < 23$ m), malé okružní křižovatky ($23 \text{ m} < D < 50 \text{ m}$) a velké ($D > 50 \text{ m}$). Nyní se normy a technické předpisy rozcházejí v terminologii. Označení "miniokružní křižovatka" zůstalo, ale nově se setkáme s označením "okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem" (dříve "malá") a "okružní křižovatka se dvěma a více jízdními pruhy" (dříve "velká"), což je pro jejich dělení logičtější [4].

2.2.1 Okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem

Okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem je základním a nejvhodnějším typem okružní křižovatky a je charakterizována:

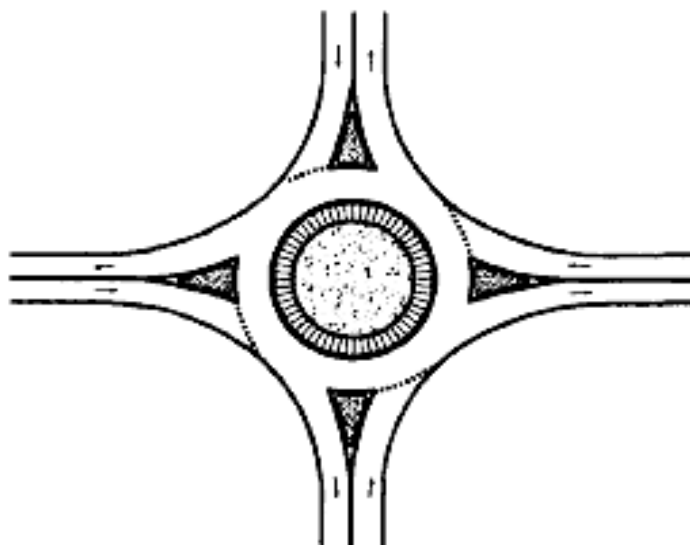
- jednopruhovým okružním pásem a obvykle jednopruhovými vjezdy a výjezdy,
- obvykle kruhovým tvarem,
- průměrem vnějšího okraje okružního jízdního pásu 23 m až 50 m, při počtu paprsků více než čtyři může být průměr větší,
- návrhová rychlost je v celé křižovatce včetně vjezdů a výjezdů u okružních křižovatek s vnějším průměrem okružního jízdního pásu $D > 23 \text{ m}$ a $< 50 \text{ m}$ 30 kmh^{-1} , u okružních křižovatek s vnějším průměrem $D > 50 \text{ m}$ 50 kmh^{-1} [4].

Uspořádání, vlastnosti a použití

Vjezdy na okružní jízdni pás se uskutečňují způsobem odpovídajícím stykové křižovatce s předností na okružním jízdním páse. Na okružním jízdním páse nedochází k průpletům.

Okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem optimalizují požadavky na bezpečnost dopravy a kapacitu a umožňují průjezd všech kategorií silničních vozidel. V případě, že okružní křižovatka má umožňovat průjezd nadměrných nákladů, ověří se její vhodnost pomocí horizontálních a vertikálních trajektorií příslušné nákladní soupravy. Průjezd rozměrných vozidel je možné usnadnit průjezdem přes zpevněnou část středového ostrova a srpovitým zpevněním krajnice. [1]

Okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem je zobrazena na obr. č. 2.1.



Obr. č. 2.1: Okružní křižovatka s jedním jízdním pruhem [4].

2.2.2 Miniokružní křižovatky

Miniokružní křižovatky se používají především v zastavěných oblastech při malých intenzitách dopravy a skladbě dopravního proudu z vozidel kategorie M1 a N1.

Miniokružní křižovatka je charakterizována:

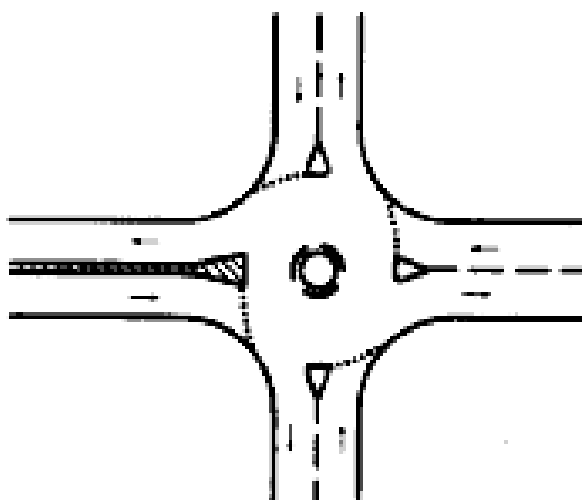
- vnější průměr okružního jízdního pásu křižovatky je $D \leq 23$ m,
- umožňuje plynulý průjezd směrodatného vozidla skupiny M1 a skupiny N1 po zpevněné vozovce okružního jízdního pásu (bez pojezdu zpevněného středového ostrova),
- okružní jízdní pás má jen jeden jízdní pruh v šířce nejméně 4,00 m, případně upravený podle vlečných křivek směrodatného vozidla,
- vjezd do křižovatky je jednopruhový,
- vjezdy a výjezdy miniokružní křižovatky na stejném paprsku křižovatky zpravidla nejsou rozděleny směrovacím ostrůvkem, ani dopravním stínem,

- středový ostrov je řešen jako plně pojížděný s odlišným povrchem co do struktury povrchu, příčného profilu, po-případě barvy, a to pro průjezd větších vozidel, než je směrodatné vozidlo,
- příčné sklony se navrhují jako u průsečných nebo stykových křižovatek s výjimkou zpevněných středových ostrovů, které mají mít odlišný příčný sklon i povrch,
- návrhová rychlost je v celé křižovatce včetně vjezdů a výjezdů 30kmh^{-1} . [4]

Uspořádání, vlastnosti a použití

Miniokružní křižovatka má základní vlastnosti shodné s okružní křižovatkou s jedním jízdním pruhem. Odlišuje se úsporností rozměrů navrhovaných prvků vyžadovanou omezenou plochou pro návrh nebo s plochou postačující pro zajištění převažujícího provozu osobních automobilů. Navrhuje se zpravidla v těsné obytné zástavbě nebo v jinak omezeném území a tam, kde se vyskytuje pouze ojedinělý průjezd nákladních vozidel (např. svoz odpadků, hasiči, případně autobusy). Tento typ zajišťuje plynulý průjezd osobních vozidel a s uplatněním určitých úprav, tj. částečně nebo plně pojížděný středový ostrov nebo srpovité zpevnění krajnic, i průjezd nákladních vozidel [1].

Miniokružní křižovatka je zobrazena na obr. č. 2.2.



Obr. č. 2.2: Miniokružní křižovatka [4].

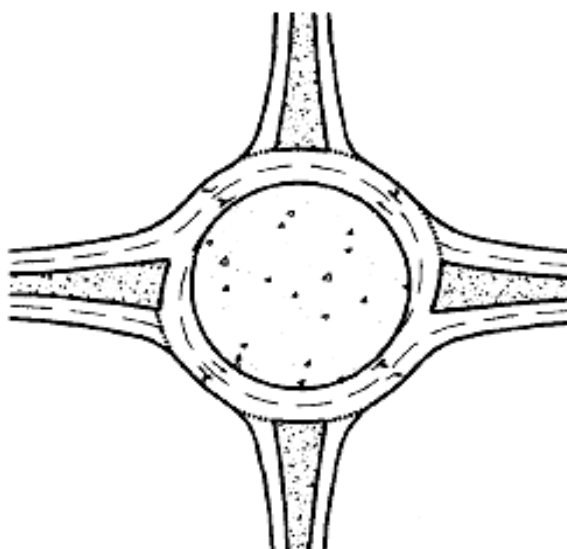
2.2.3 Okružní křižovatky se dvěma a více jízdními pruhy

Tento typ okružní křižovatky se navrhuje jen ve zdůvodněných případech. Je charakterizován dvěma nebo více jízdními pruhy na okružním jízdním pásu. Počet jízdních pruhů na vjezdu a výjezdu odpovídá obvykle počtu jízdních pruhů příslušného paprsku křižovatky. V případě intenzivní dopravy vjíždějící do okružní křižovatky je vhodné zvětšit počet jízdních pruhů na vjezdu pro rozřazení vozidel podle příslušných výjezdů (cílů dopravy). Rozřazení vozidel musí být vyznačeno svislým a vodorovným značením [4].

Všeobecné uspořádání a základní principy návrhu okružních křižovatek se dvěma a více jízdními pruhy jsou shodné s těmi, které platí pro okružní křižovatky s jedním jízdním pruhem.

Nevýhodou tohoto typu okružní křižovatky bez úpravy organizace dopravy na křižovatce jsou průplety vozidel na okružním jízdním pásu s důsledkem vyšší nehodovosti ve srovnání s okružními křižovatkami s jedním jízdním pruhem a většími nároky na pozemky. Z důvodu omezení nehodovosti je účelné navrhnout usměrnění dopravy na okružním pásu spirálovým uspořádáním jízdních pruhů a dopravním značením, které vyloučí průplety [1].

Okružní křižovatka se dvěma jízdními pruhy je zobrazena na obr. č. 2.3.



Obr. č. 2.3: Okružní křižovatka se dvěma jízdními pruhy [4].

2.3 Definice a terminologie související s modelováním systému

V následujícím textu uvádím vysvětlení definic a terminologie související s modelováním systémů, jejichž znalost je pro další chápání textu klíčová.

Systém

Systém můžeme obecně definovat jako soubor elementárních částí (prvků systému), které mají mezi sebou určité vazby (propojení prvků). Systém můžeme dále dělit podle různých kritérií např. na:

- reálné (již existující systémy - např. křižovatka),
- nereálné (neexistující systémy - plánované systémy),
- statické (nemění stav v čase),
- dynamické (mění stav v čase).

Model

Model je napodobenina systému jiným systémem — například počítačovým programem. Model systému musí napodobovat všechny pro naše účely podstatné vlastnosti systému. [3].

Modelování

Modelování je proces vytváření modelů systémů na základě našich znalostí. Tento proces je obecně velmi náročný a často vyžaduje znalosti z více oborů. Kvalita vytvořeného modelu zásadním způsobem ovlivní výsledky získané experimentováním s modelem [3].

Simulace

Simulace je metoda získávání nových znalostí o systému experimentováním s jeho modelem. Pro účely simulace musí být model popsán odpovídajícím způsobem – ne každý model je pro simulaci vhodný. Pro získání potřebných informací obvykle potřebujeme opakovat simulační experimenty vícekrát s různými parametry (proudy pseudonáhodných čísel) [3].

2.4 Využití, výhody a nevýhody simulací

V praxi je simulace hojně využívána při projektování, plánování či optimalizaci různorodých procesů. Počítačová simulace se díky svým vlastnostem, které jsou uvedeny níže, stává velmi oblíbeným optimalizačním nástrojem [3].

Mezi hlavní výhody simulačních metod patří:

- Cena – experimenty s reálným systémem mohou být velmi drahé – např. Crash testy automobilů,
- Rychlost – simulaci můžeme dle potřeby zrychlovat (simulace pomalých dějů) i zpomalovat (simulace rychlých dějů),
- Bezpečnost – počítačové simulace dovolují bezpečně provádět pokusy, které by byly v reálu nebezpečné (simulace hromadné autonehody atd.),
- Možnost modelovat velmi složité systémy – omezení jsme pouze výkonem stroje, na kterém simulaci provádíme (simulace lidské populace),
- Jediný možný způsob zkoumání dějů je simulace - např. simulace srážky galaxií.

Vedle výše zmíněných výhod použití počítačových simulací se vyskytují i některé nevýhody, které je potřeba také zmínit:

- **Validita modelu** – je velmi důležité dbát na validitu modelu. Ve chvíli kdy máme vytvořen chybný model, který zdánlivě vrací správná data (dle porovnání s reálným objektem), může mít tato skutečnost zásadní následky na průběh simulace a experimentů (chyba se může projevit pouze při určité situaci). Před prováděním experimentů je tedy potřeba provádět pečlivou kontrolu správnosti vytvořeného simulačního modelu.
- **Náročnost na výpočetní výkon** – většina dnešních superpočítačů je dnes využívána především pro simulace. S

rostoucím výkonem osobních počítačů lze ale velké množství relativně náročných simulací provádět právě na těchto počítačích.

- **Simulací získáváme konkrétní numerické výsledky** – pokud provedeme změnu parametrů systému a potřebujeme získat relevantní výsledky, pak musíme celou simulaci opakovat, což může být značně časově náročné.
- **Vysoká náročnost modelů** – při modelování složitých a rozsáhlých systémů .

Pro řešení práce je třeba nejdříve zvolit konkrétní okružní křižovatku. Na konkrétní křižovatce je nutné zjistit parametry vstupních toků vozidel pro jednotlivé vjezdy. Pro zjištění parametrů vstupních toků vozidel na jednotlivých vjezdech je nutné provést dopravní průzkum na konkrétní okružní křižovatce. Příjezdy vozidel vstupujících do křižovatky je třeba otestovat na Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti. Po provedení dopravního průzkumu a analýzy dat z dopravního průzkumu bude sestaven model konkrétní okružní křižovatky a na modelu provedeny experimenty. Výpočty získané simulací budou porovnány s výpočty dle metodik pro výpočet okružních křižovatek.

2.5 Dopravní průzkum

Úkolem průzkumů je především zajistit maximum údajů o současném stavu dané činnosti nebo jevu a jeho zákonitostech. Toto platí obecně pro všechny konstruktivní činnosti, jejichž cílem je znát podstatu věci [2].

Na konkrétní křižovatce je třeba provést dopravní průzkum pro získání parametrů jednotlivých dopravních proudů vstupujících do křižovatky, vystupujících z křižovatky a pohybujících se v křižovatce.

Doporučená doba průzkumu

Doba průzkumu se volí s ohledem na:

- Účel průzkumu,
- Potřebnou přesnost výsledku,
- Charakter dopravy.

Před průzkumem se zjistí, zda provoz na sledovaném úseku nebude ovlivněn mimořádnými událostmi (uzavírky a dopravní omezení).

Průzkum intenzit dopravy se průzkum provádí:

- V běžné pracovní dny.
- V měsících duben, květen, červen, září a říjen.

Podle účelu provedení průzkumu jsou čas a jeho trvání různé. Pro objektivitu intenzit dopravy průměrného pracovního dne se berou úterý, středa, čtvrtek [2].

Rozsah dopravního průzkumu

Dopravní průzkum je dále možno rozdělit podle rozsahu dopravního průzkumu na:

- Úplný dopravní průzkum – zkoumáme ve sledovaném období všechny prvky, které se v dopravě vyskytují nebo které jsou nutné pro danou charakteristiku a rozsah je malý.
- Výběrový dopravní průzkum – průzkum buďto vybraných dopravních jevů nebo realizovaný na vybraném souboru účastníků dopravy. Minimální je však 3% vzorek zkoumané oblasti [2].

Homogenizace dopravního proudu

Stejnorodé složení dopravního proudu v silničním provozu je problémem především v případech, kdy je zapotřebí co nejpřesněji určit kapacitu sledované pozemní komunikace či křižovatky.

Při kapacitních výpočtech a při tvorbě modelu je přínosné a výpočet a výpočet zjednodušující, máme-li sledovaný dopravní proud pokud možno stejného složení. To samozřejmě v běžném provozu není reálné, a tudíž se používá přepočtů vozidel na tzv. jednotková vozidla. Přepočtové koeficienty jsou uvedeny v tab. 2.1.

Tab. 2.1: Přepočtové koeficienty [6].

Druh vozidla	Přepočtový koeficient [jv]
Jednostopé vozidlo	0,8
Osobní automobil	1
Nákladní vozidlo, autobus	2
Kloubový autobus, jízdní souprava	3

2.6 Výpočet kapacity okružních křižovatek

V této kapitole jsou vyjmenovány metody pro výpočet kapacity okružních křižovatek, dále rozvedena je pouze metoda používaná dle technických podmínek pro projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích TP135, které vycházejí ze švýcarské metody prof. Bovyho (ETH Lausanne) z roku 1991 [11].

Další metody pro kapacitní výpočet okružní křižovatky:

- Bovy (1991) a jejich modifikace,
- německé metody podle Wu (1997), resp. HBS (2001).[11]

Výpočty dosažené simulací okružní křižovatky budou porovnány s následujícími výpočty provedenými dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek.

Kapacita vjezdu okružní křižovatky o vnějším průměru $D < 50$ m se stykovým napojením jednopruhového vjezdu na jednopruhový okružní jízdní pás.

Maximální hodnoty kapacity L_e jednoho vjezdu za předpokladu známých hodnot zatížení vjezdu a výjezdu jsou určeny na základě následujících vztahů:

$$L_e = 1500 - \frac{8}{9} * (Q_k + \alpha * Q_a) [\text{vj/h}] \quad (2.1)$$

Kde:

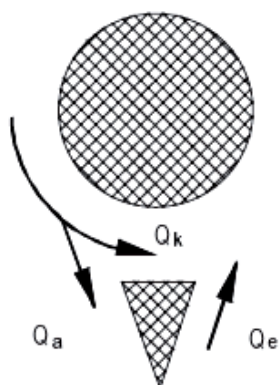
Q_a - intenzita vozidel na výjezdu [vj/h],

Q_k - intenzita vozidel na vozovce okružního pásu [vj/h],

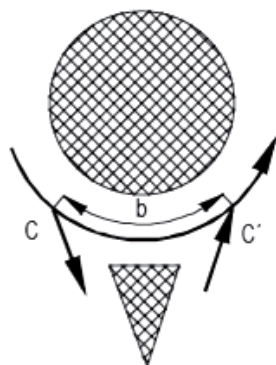
L_e – kapacita jednoho vjezdu [vj/h],

α – faktor α – zohledňuje geometrické poměry vjezdu [-].

Vzájemná vzdálenost vjezdu a výjezdu na jednom paprsku křižovatky je dána faktorem α , který odečteme z grafu na obr. č. 2.6. Prostřednictvím faktoru α jsou zohledňovány geometrické poměry vjezdu okružní křižovatky v závislosti na vzdálenosti b (obr. č. 2.5) mezi dvěma kolizními body C a C'. Vyznačení intenzit vozidel potřebných pro výpočet je na obr. č. 2.4.

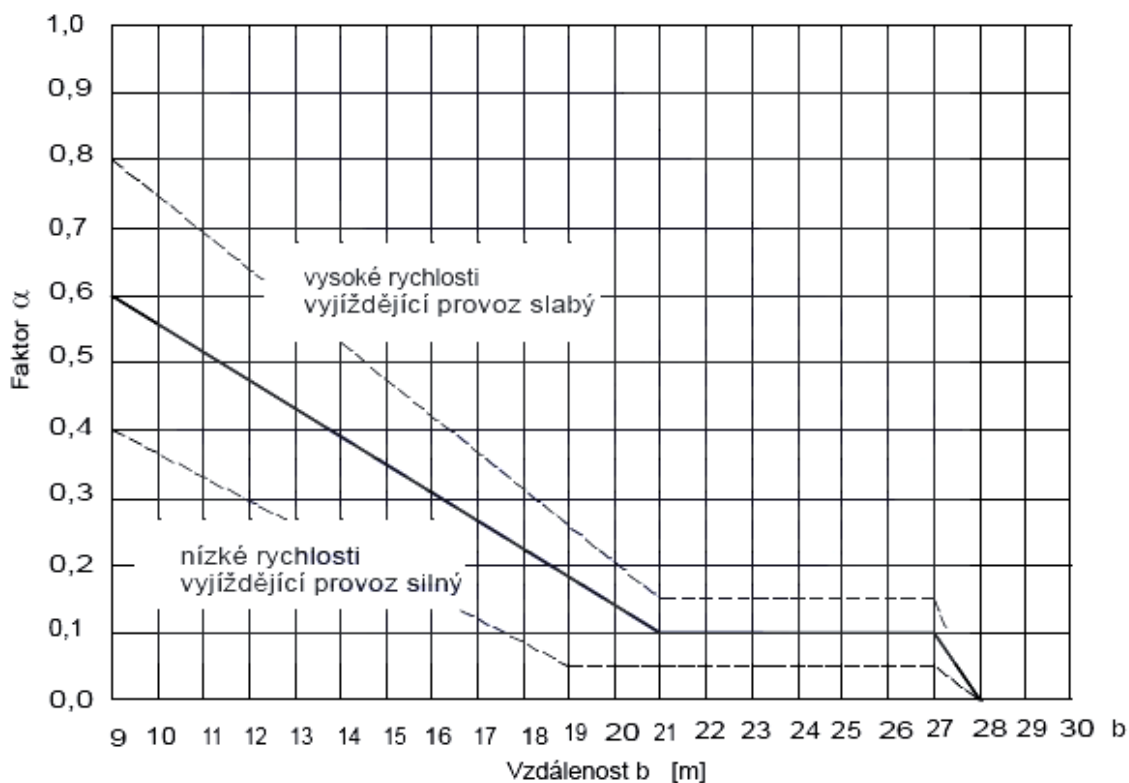


Obr. č. 2.4: Označení zatížení dopravních proudů okružní křižovatky [1].



Obr. č. 2.5: Vzdálenost b mezi kolizními body C-C' [1].

Jak vyplývá z následujícího grafu, bude se velikost faktoru α snižovat se zvyšující se hodnotou vzdálenosti kolizních bodů C-C' (b) a se snižující se rychlostí. Tím se současně také zvyšuje kapacita vjezdu.



Obr. č. 2.6: Graf pro zjištění faktoru α [1].

Snížení kapacity okružní křižovatky vlivem provozu chodců po přechodech se zanedbává s ohledem na skutečnost, že výpočet kapacity okružní křižovatky

je v časové jednotce jedné hodiny s dostatečnou kapacitní rezervou a v případě vyššího dopravního zatížení na vjezdu mají vjíždějící vozidla prodlevy, kterých využijí chodci pro přechod [1].

Stupeň vytížení okružní křižovatky

Stupeň vytížení konkrétního vjezdu se vypočte dle následujícího vztahu.

$$ALG_e = \frac{Q_e}{L_e} \cdot 100 [\%] \quad (2.2)$$

Kde:

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h],

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h],

ALG_e – stupeň vytížení vjezdu [%].

Rezerva kapacity

Rezerva kapacity konkrétního vjezdu se vypočte dle následujícího vztahu.

$$R = L_e - Q_e \text{ [jv/h]} \quad (2.3)$$

Kde:

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h],

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h],

R – rezerva vjezdu [jv/h].

Čekací doba

Střední čekací dobu vypočteme dle následujícího vztahu.

Výpočet podle Kimber/Holise

$$t_w = \frac{2000 + 2 \cdot Q_k}{L_e - Q_e} [s] \quad (2.4)$$

Kde:

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h],

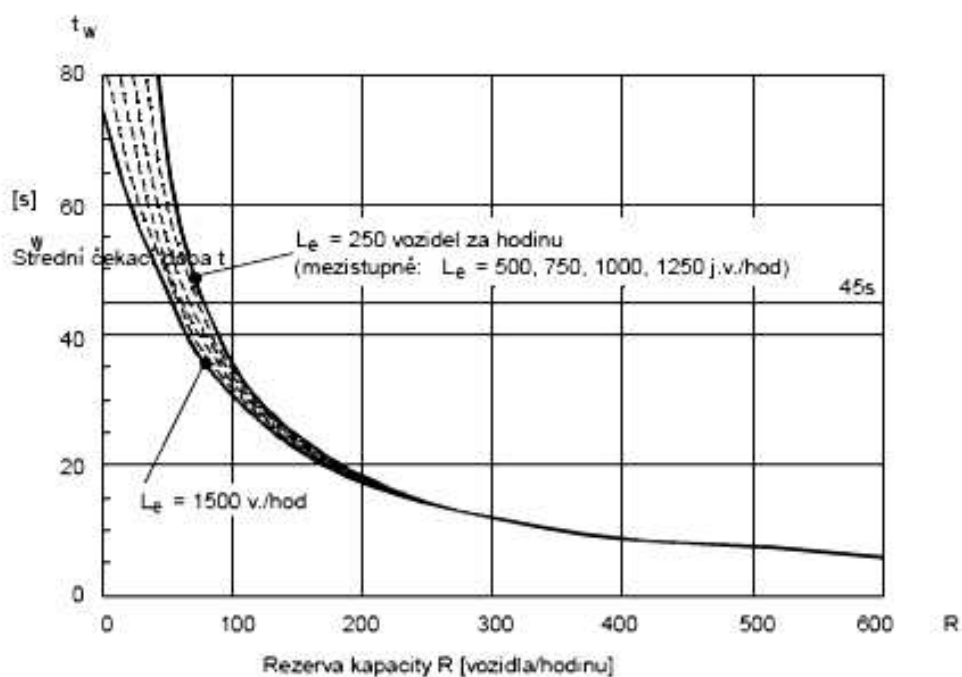
Q_k - intenzita vozidel na vozovce okružního pásu [jv/h] ,

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h] ,

t_w – průměrná doba čekání [s].

Odečtení z grafu

Střední čekací dobu lze také zjistit odečtením z grafu na obr. č. 2.7 pomocí rezervy kapacity (R) a kapacity vjezdu (L_e). V této diplomové práci používám pro výpočet střední čekací doby výpočet dle Klimber/Holise.



Obr. č. 2.7: Střední čekací doba v závislosti na rezervě kapacity a kapacitě vjezdu [1].

Při navrhování okružních křižovatek je zpravidla ještě únosná čekací doba do 60 sekund. Delší doba se účastníkům silničního provozu jeví jako nepřijatelná [1].

Délka čekající fronty

Délka čekající fronty (L) se vypočte ze střední čekací doby t_w [s] takto z následujícího vztahu.

$$L = \frac{Q_e \cdot t_w}{3600} \cdot L_{voz} [m] \quad (2.5)$$

Kde:

L_{voz} průměrná délka vozidla + mezera se volí 6 m [1].

L – průměrná délka čekající fronty [m],

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h],

t_w – průměrná doba čekání [s].

2.7 Pearsonův χ^2 test dobré shody

Předpoklad, že se počet příjezdějících vozidel k okružní křižovatce řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti je třeba ověřit. Je tedy třeba otestovat, zda se data získaná dopravním průzkumem opravdu řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti. K tomuto ověření použijí matematický aparát testování hypotéz.

Jednotlivé kroky testování hypotéz jsou vyjmenovány v následujících odrážkách:

- Formulace nulové a alternativní hypotézy
- Zvolení přijatelné chyby rozhodování α (hladina významnosti).
- Volba testovacího kritéria.
- Výpočet hodnoty testovacího kritéria.
- Určení kritických hodnot testovacího kritéria.
- Rozhodnutí – zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy.

Pearsonův χ^2 test dobré shody testuje rozdíl mezi empiricky získanými daty a teoretickým průběhem rozdělení, přičemž posuzujeme, zda je tento rozdíl statisticky významný či nikoliv na předem zvolené hladině významnosti α .

Nulová hypotéza H_0 - naměřená data se řídí předpokládaným rozdělením pravděpodobnosti s konkrétními parametry.

Alternativní hypotéza H_1 - naměřená data se neřídí předpokládaným rozdělením pravděpodobnosti s konkrétními parametry.

Testovací kritérium je ve tvaru:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} \rightarrow \chi_{k-h-1}^2 \quad (2.6)$$

Kde:

n - rozsah výběru,

m_i - empirické četnosti,

p_i - teoretické pravděpodobnosti,

k - počet tříd,

h - počet parametrů daného rozdělení pravděpodobnosti.

Rozhodnutí o zamítnutí či nezamítnutí nulové hypotézy je na zvolené hladině významnosti α na základě srovnání:

- $\chi^2 \geq \chi_{krit}^2$ zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotézy,
- $\chi^2 < \chi_{krit}^2$ nezamítáme nulovou hypotézu.

Kde χ_{krit}^2 je pro dané α a pro počet stupňů volnosti $\nu = k - h - 1$ tabelovanou hodnotou (případně jej můžeme vypočítat v Excelu pomocí funkce $CHIINV(\alpha, \nu)$).

k - počet tříd,

h - počet parametrů daného rozdělení pravděpodobnosti.

2.8 Intervalové odhady

Metoda intervalového odhadu je založená na tom, že na základě náhodného výběru určíme meze intervalu, který s předem danou pravděpodobností obsahuje neznámou hodnotu populační charakteristiky. Tento interval nazýváme interval spolehlivosti, jeho hranice meze spolehlivosti.

Pravděpodobnost, že interval spolehlivosti obsahuje neznámou populační charakteristiku, se nazývá spolehlivost odhadu a značí se $1-\alpha$. V praxi se obvykle požaduje, aby spolehlivost odhadu byla blízká jedné, obvykle 0,9, 0,95 nebo 0,99. Jedná se pak o 90%, 95% nebo 99% interval spolehlivosti. Pravděpodobnost α se nazývá hladina významnosti, obvykle se tedy volí rovna některé z hodnot $\alpha=0,1$, $\alpha=0,05$, nebo $\alpha=0,01$. V praxi se nejčastěji setkáváme se dvěma posledně uvedenými volbami hladiny významnosti [8].

Přesnost odhadu posuzujeme podle šířky intervalu spolehlivosti. S rostoucí šířkou intervalu spolehlivosti klesá přesnost odhadu.

Intervaly spolehlivosti pro charakteristiky základního souboru můžeme zadávat tímto trojím způsobem:

- jsou omezeny pouze shora,
- jsou omezeny pouze zdola,
- jsou omezeny zdola i shora.

V prvních dvou případech mluvíme o jednostranném intervalu spolehlivosti, ve třetím případě o oboustranném intervalu spolehlivosti. V případě, kdy je interval omezen shora, jedná se o interval pravostranný, je-li interval omezen zdola, jedná se o interval levostranný [8].

Intervalový odhad střední hodnoty

Označme dolní mez intervalu spolehlivosti T_d a horní mez intervalu spolehlivosti T_h .

Předpokladem je, že náhodný výběr pochází z normálního rozdělení.

Mohou nastat dva případy:

- Je známa směrodatná odchylka normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr.
- Není známa směrodatná odchylka normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr.

Není známa směrodatná odchylka normálního rozdělení, ze kterého pochází náhodný výběr.

Dolní mez intervalu spolehlivosti stanovíme ze vztahu:

$$T_d = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} \quad (2.7)$$

Kde:

\bar{x} - průměr hodnot,

n – rozsah statistického souboru,

s – směrodatná odchylka,

$t_{1-\alpha/2;n-1}$ - příslušná hodnota kvantilu Studentova rozdělení.

Horní mez intervalu spolehlivosti stanovíme ze vztahu:

$$T_h = \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} \quad (2.8)$$

Kde:

\bar{x} - průměr hodnot,

n – rozsah statistického souboru,

s – směrodatná odchylka,

$t_{1-\alpha/2;n-1}$ - příslušná hodnota kvantilu Studentova rozdělení.

Příslušnou hodnotu kvantilu Studentova rozdělení získáme odečtením ze statistických tabulek, případně z excelu funkcí $TINV(\alpha, n-1)$. [8]

Další možnosti výpočtu intervalového odhadu zde neuvádím, jelikož nejsou v práci použity.

2.9 Rozdělení pravděpodobnosti použité v této práci

2.9.1 Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti $Po(\lambda)$

Poissonovo rozdělení patří mezi diskrétní náhodné proměnné.

Toto rozdělení pravděpodobnosti mají náhodné proměnné, které popisují četnosti jevů s těmito vlastnostmi:

- To, že jev v daném intervalu (časovém, prostorovém) nastane (nenastane), nezávisí na tom, co se stalo jindy nebo jinde.
- Pro každý časový okamžik je pravděpodobnost jevu v malém časovém intervalu stejná.
- Neexistuje případ, že by nastaly dva jevy přesně v jednom časovém okamžiku.

Průměrný počet výskytů zkoumaného jevu v daném úseku jednotkové délky označujeme λ . [9]

Pravděpodobnostní funkce je definována:

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda} \text{ pro } \lambda > 0, k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

$$P(X = k) = 0 \text{ jinde} \quad (2.10)$$

Pro střední hodnotu a rozptyl platí:

$$EX = DX = \lambda \quad (2.11)$$

2.9.2 Exponenciální rozdělení $E(\lambda)$

Toto rozdělení má spojitá náhodná veličina X , která představuje dobu čekání do nastoupení (Poissonovského) náhodného jevu, nebo délku intervalu (časového nebo délkového) mezi takovými dvěma jevy (např. doba čekání na obsluhu, doba mezi příjezdy vozidel na vjezdu okružní křižovatky).

Závisí na parametru λ , což je převrácená hodnota střední hodnoty doby čekání do nastoupení sledovaného jevu.[9]

Hustota pravděpodobnosti:

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \text{ pro } x > 0, \lambda > 0 \quad (2.12)$$

$$f(x) = 0 \quad \text{jinde} \quad (2.13)$$

Distribuční funkce:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda \cdot x} \text{ pro } x > 0, \lambda > 0 \quad (2.14)$$

$$F(x) = 0 \quad \text{jinde} \quad (2.15)$$

Pro střední hodnotu a rozptyl platí:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad (2.16)$$

$$D(X) = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.17)$$

2.9.3 Erlangovo rozdělení pravděpodobnosti Erlang(k, λ)

Erlangovo rozdělení je rozdělení spojitého typu definované dvěma parametry. Erlangovo rozdělení je definováno parametrem tvaru k , kde $k \in \mathbb{N}$ a parametrem měřítka λ , kde $\lambda > 0$ [10].

Hustota pravděpodobnosti:

$$f(x) = \frac{(\lambda x)^{k-1}}{(k-1)!} \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{pro } x > 0 \quad (2.18)$$

$$f(x) = 0 \quad \text{jinde} \quad (2.19)$$

Pro střední hodnotu a rozptyl platí:

$$E(X) = \frac{k}{\lambda} \quad (2.20)$$

$$D(X) = \frac{k}{\lambda^2} \quad (2.21)$$

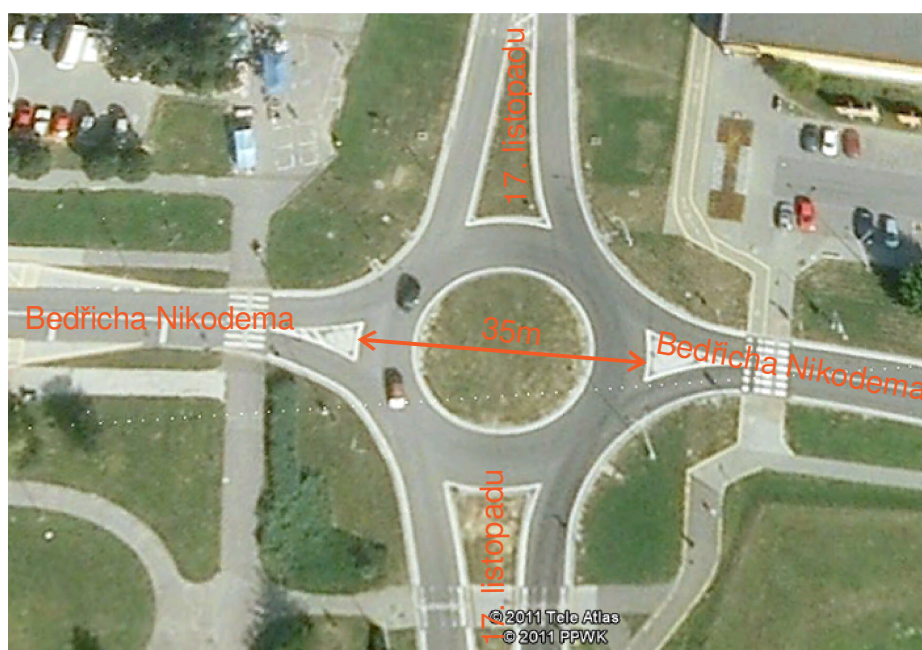
Exponenciální rozdělení je tedy speciálním případem Erlangova rozdělení pro $k = 1$.

3 Analýza vstupních údajů pro potřeby simulace

Pro potřeby simulace byl na konkrétní křižovatce proveden dopravní průzkum. Intenzity vozidel v jednotlivých proudech byly přepočteny na jednotková vozidla. Předpoklad Poissonova rozdělení pravděpodobnosti na jednotlivých vstupech okružní křižovatky je ověřen Pearsonovým testem dobré shody.

3.1 Popis konkrétní okružní křižovatky

Pro řešení diplomové práce byla zvolena okružní křižovatka na ulicích 17. listopadu a Bedřicha Nikodema v Ostravě Porubě. Zvolená křižovatka je zobrazena na leteckém pohledu na obr. č. 3.1. Jedná se o okružní křižovatku s jedním jízdním pruhem a vnějším průměrem jízdního pásu 35 m. Návrhová rychlost na okružním páse této křižovatky je 30 km/h. Tato okružní křižovatka má vyvýšený středový ostrov o průměru 20 m a šířku jízdního pásu 7,5 m.



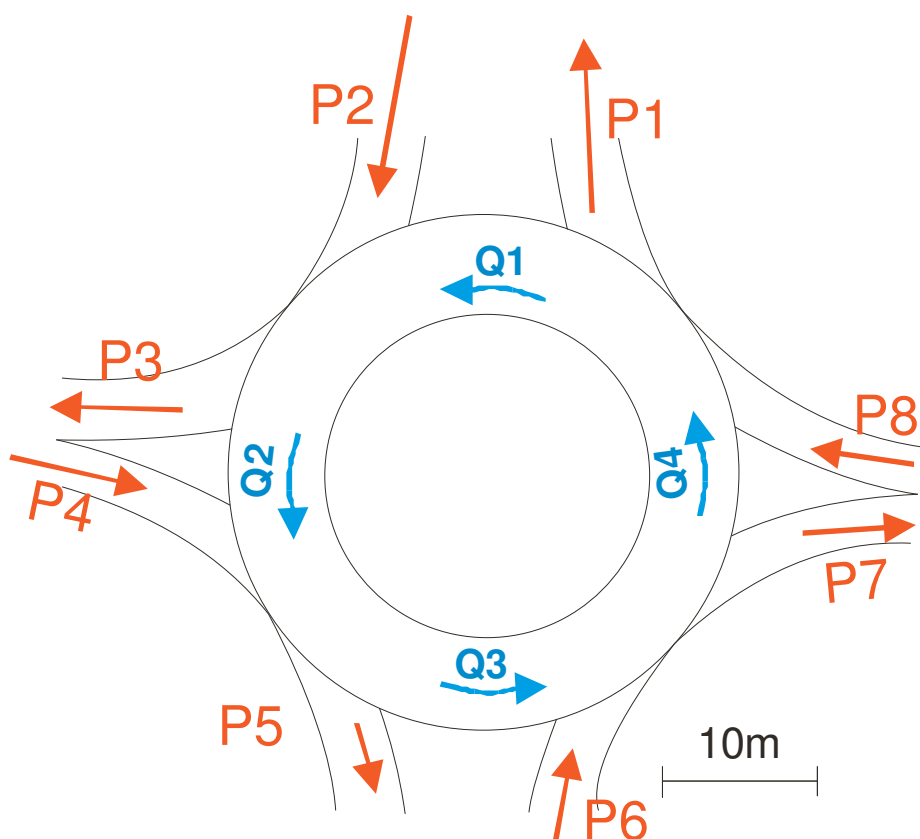
Obr. č. 3.1: Letecký pohled na okružní křižovatku [5].

3.2 Dopravní průzkum na konkrétní křižovatce

Pro získání potřebných dat o intenzitách dopravních proudů vstupujících do křižovatky, vystupujících z křižovatky a pohybujících se v křižovatce jsem provedl následující dopravní průzkumy.

Příprava dopravního průzkumu

V náčrtku zvolené okružní křižovatky na obr. č. 3.2 jsem vyznačil dopravní proudy, ve kterých je nutné sledovat intenzitu projíždějících vozidel.



Obr. č. 3.2: Vyznačení dopravních proudů v okružní křižovatce.

Průzkum intenzit v jednotlivých dopravních proudech

V každém z vyznačených dopravních proudů jsem provedl hodinový dopravní průzkum za účelem zjištění hodinových intenzit vozidel v jednotlivých dopravních proudech. Počty jednotlivých vozidel v jednotlivých dopravních proudech a přepočet na jednotková vozidla je uveden v tabulkách v příloze A. Pro názornost zde uvádím v tab. 3.1 vyhodnocení a přepočet na jednotková vozidla dopravního průzkumu pro dopravní proud P1.

Tab. 3.1: Vyhodnocení dopravního průzkumu a přepočítání na jednotková vozidla pro proud P1.

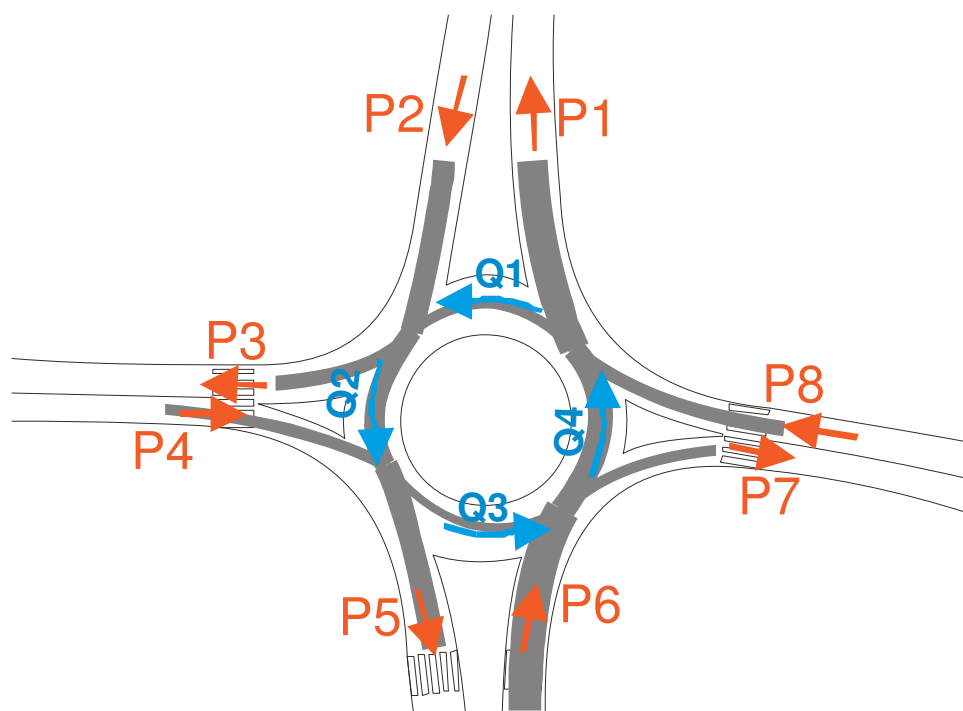
Proud: P1				
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:22 do 15:22		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel [voz/h]	přepočtový koeficient [-]	jednotkových vozidel [jv/h]
osobní automobily		392	1	392
autobusy	sólo	27	2	54
	kloubové	4	3	12
jízdní soupravy		5	3	15
nákladní automobily		10	2	20
Kontrolní součet		438		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				493

Intenzity v ostatních sledovaných dopravních proudech uvádím tab. 3.2. Tyto intenzity jsou analogicky jako v tabulce 1 přepočteny na jednotková vozidla.

Tab. 3.2: Intenzity vozidel v jednotlivých dopravních proudech [jv/h].

Dopravní proud	Intenzita [jv/h]
P1	493
P2	426
P3	228
P4	168
P5	378
P6	485
P7	174
P8	194
Q1	174
Q2	342
Q3	136
Q4	405

Grafické znázornění intenzit v jednotlivých dopravních proudech je znázorněno na obr. č. 3.3. Šíře čáry procházející okružní křižovatkou je přímo úměrná intenzitě daného dopravního proudu.



Obr. č. 3.3: Grafické znázornění intenzit v jednotlivých dopravních proudech.

3.3 Ověření vstupních proudů na Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti

Pro potřeby simulace je třeba ověřit, zda se počet vstupujících vozidel za určitý čas na jednotlivých vjezdech okružní křižovatky řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti.

Pro toto ověření jsem provedl dopravní průzkum, ve kterém jsem zaznamenával počet projetých vozidel v intervalech po jedné minutě po dobu šedesáti minut. Získal jsem tedy pro každý vstupní proud do okružní křižovatky statistický výběr o rozsahu 60. Tento statistický soubor je připojen k práci v příloze B.

3.3.1 Odhad parametru λ Poissonova rozdělení

Pro ověření, zda statistický soubor pochází z Poissonova rozdělení pravděpodobnosti, musíme nejprve získat parametr teoretického Poissonova rozdělení pravděpodobnosti. Toto rozdělení má jeden parametr $\lambda > 0$. Odhad parametru λ získám metodou maximální věrohodnosti. Nejvěrohodnějším

odhadem střední hodnoty je podle této metody výběrový průměr, který se vypočte dle vztahu 3.1.

$$\lambda = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot v_i \quad (3.1)$$

Kde:

n – rozsah statistického souboru

n_i – četnost v i -té třídě

v_i – hranice tříd [jv/min]

Příklad výpočtu parametru λ provedu pro vstupní dopravní proud P2, pro ostatní vstupní proudy je výpočet parametru λ uveden v příloze C této práce.

Za 1 hodinu projelo sledovaným dopravním proudem P2 426 vozidel, výsledky sledování jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3: Data pro výpočet parametru λ a pro ověření Poissonova rozdělení pravděpodobnosti pro vstupní proud P2.

Vozidel/min	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
četnost	1	2	6	10	9	10	3	6	6	4	1	2

Příklad výpočtu parametru λ pro dopravní proud P2

$$\lambda = \bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot v_i = \frac{1}{60} (1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + \dots + 2 \cdot 13) = 7,1 \text{ jv/min} \quad (3.2)$$

Pro ostatní vstupní proudy byl parametr λ vypočten analogicky jako pro dopravní proud P2. Hodnoty parametru λ pro jednotlivé dopravní proudy jsou zobrazeny v tab. 3.4.

Tab. 3.4: Parametr λ pro jednotlivé vstupní proudy.

dopravní proud	P2	P4	P6	P8
parametr λ [jv/min]	7,1	2,8	8,1	3,2

3.3.2 Ověření vstupních proudů na Poissonova rozdělení pravděpodobnosti

Ověření Poissonova rozdělení pravděpodobnosti provedu tabelární metodou. V textu práce uvedu ověření Poissonova rozdělení pro dopravní proud P2, pro ostatní vstupní proudy je ověření Poissonova rozdělení uvedeno v příloze D této práce.

Formulace nulové a alternativní hypotézy:

Nulová hypotéza H_0 – data získaná dopravním průzkumem se řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s konkrétním parametrem $\lambda = 7,1$ jv/min.

Alternativní hypotéza H_1 – data získaná dopravním průzkumem se neřídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti konkrétním parametrem $\lambda = 7,1$ jv/min.

Pearsonův test dobré shody provádím na hladině významnosti $\alpha = 0,05$

Ověření Poissonova rozdělení pro dopravní proud P2 je uvedeno v tabulce 6.

Teoretické pravděpodobnosti jsou vypočteny pomocí funkce v excelu:

Vztah pro výpočet pravděpodobnostní funkce:

$$P(X = i) = \frac{\lambda^i}{i!} \cdot e^{-\lambda} \quad (3.3)$$

Pro 2 a méně vozidel za minutu

$$\begin{aligned} P(X = 2 \text{ a méně}) &= P(X = 0) + P(X = 1) + P(X = 2) = \\ &= \frac{7,1^0}{0!} \cdot e^{-7,1} + \frac{7,1^1}{1!} \cdot e^{-7,1} + \frac{7,1^2}{2!} \cdot e^{-7,1} = 0,027 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Pro výpočet v excelu byla použita funkce:

$$P_2 \text{ a méně} = POISSON(i; \lambda; 1) \text{ pro } i = 2$$

$$\text{kde } \lambda = 7,1$$

Pro 3,4,...,12 vozidel za minutu

Příklad výpočtu pro P_3 , pro P_4 až P_{12} probíhá výpočet analogicky.

$$P(X = 3) = \frac{7,1^3}{3!} \cdot e^{-7,1} = 0,049 \quad (3.5)$$

Pro výpočet v excelu byla použita funkce:

$$P_i = POISSON(i; \lambda; 0) \text{ pro } i = 3, 4, \dots, 12$$

Pro 3 až 12 vozidel

$$\text{kde } \lambda = 7,1$$

Pro 13 a více vozidel

$$P(X = 13 \text{ a více}) = 1 - (P(X = 0) + P(X = 1) + P(X = 2) + \dots + P(X = 12)) = 0,03 \quad (3.6)$$

Pro výpočet v excelu byla použita funkce:

$$P_i = 1 - POISSON(i; \lambda; 1) \text{ pro } i = 12$$

$$\text{kde } \lambda = 7,1$$

Výpočet teoretických pravděpodobností a teoretických četností je uveden v tab. 3.5.

Tab. 3.5: Výpočet teoretických relativních četností P_i a výpočet teoretických četností $n \cdot P_i$.

Dopravní proud P2	třídy	i	m_i	P_i	$n \cdot P_i$
	1	2 a méně	1	0,027	1,649
	2	3	2	0,049	2,953
	3	4	6	0,087	5,242
	4	5	10	0,124	7,443
	5	6	9	0,147	8,808
	6	7	10	0,149	8,934
	7	8	3	0,132	7,929
	8	9	6	0,104	6,255
	9	10	6	0,074	4,441
	10	11	4	0,048	2,866
	11	12	1	0,028	1,696
	12	13 a více	2	0,030	1,784
	kontrolní součet		60	1,000	60,000

Tento test vyžaduje, aby všechny teoretické četnosti ($n \cdot p_i$) byly větší než 5. Pokud není tato podmínka dodržena, je nutno sloučit třídy tak, aby podmínka byla dodržena. V tomto případě je nutno sloučit třídy 1,2 a 3 do jedné a třídy 9, 10, 11 a 12 do jedné třídy. Tato úprava je provedena v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Sloučení tříd, ve kterých teoretická četnost nebyla větší než 5.

Dopravní proud P2	třídy	i	m _i	n*P _i	m _i -n*P _i	(m _i -n*P _i) ²	(m _i -n*P _i) ² /n*P _i
	1	4 a méně	9	9,844	-0,844	0,712	0,072
	2	5	10	7,443	2,557	6,536	0,878
	3	6	9	8,808	0,192	0,037	0,004
	4	7	10	8,934	1,066	1,137	0,127
	5	8	3	7,929	-4,929	24,293	3,064
	6	9	6	6,255	-0,255	0,065	0,010
	7	10 a více	13	10,787	2,213	4,896	0,454
	kontrolní součet		60	60,000		X _{obs}	4,610
						X _{krit}	11,070
X _{obs} <X _{krit}							

Kritickou hodnotu X_{krit} jsem získal pro hladinu spolehlivosti $\alpha = 0,05$ a pro počet stupňů volnosti $\nu = k - h - 1 = 7 - 1 - 1 = 5$

Počet tříd klesl jejich sloučením na 7 a testované Poissonovo rozdělení má jeden parametr λ , počet stupňů volnosti je tedy 5

Testovací kritérium bylo vypočteno pomocí funkce v excelu:

$$\chi^2_{krit} = CHIINV(0,05;5)=11,1$$

Výsledek je uveden v tab. 3.6.

Zjistil jsem tedy, že $\chi^2_{obs} < \chi^2_{krit}$ ($4,6 < 11,1$). Nezamítám tedy nulovou hypotézu H_0 o tom, že se počet příjezdějících vozidel v dopravním proudu P2 za 1 minutu řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s parametrem $\lambda = 7,1$. Tabeleární řešení pro ostatní vstupní dopravní proudy je přiloženo v příloze D.

Výsledky ověření parametrů vstupní dopravních proudů

V tab. 3.7 jsou zobrazeny výsledky kritických hodnot Pearsnova testu dobré shody a hodnoty pozorované u statistických souborů jednotlivých vstupních dopravních proudů.

Tab. 3.7: Výsledky Pearsonova testu dobré shody pro jednotlivé dopravní proudy vstupující do křižovatky.

dopravní proud	P2	P4	P6	P8
parametr λ	7,1	2,8	8,1	3,2
X_{obs}	4,1	3,8	1,8	1,1
X_{krit}	11,1	7,8	12,6	9,5

Z tab. 3.7 je patrné, že u všech vstupních dopravních proudů je $\chi^2_{obs} < \chi^2_{krit}$. U žádného ze vstupních proudů nezamítáme tedy nulovou hypotézu H_0 a je možné prohlásit, že se počet příjezdějících vozidel za minutu v jednotlivých dopravních proudech řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti s příslušným parametrem.

3.4 Výpočet kapacity konkrétní okružní křižovatky

V této kapitole je proveden kapacitní výpočet zvolené okružní křižovatky na ulicích 17. listopadu a Bedřicha Nikodema v Ostravě Porubě. Tento kapacitní výpočet je proveden dle metodiky technických podmínek pro projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikacích TP 135.

Vzorový výpočet je proveden pro první vjezd/výjezd. Intenzity vozidel ovlivňující výpočet kapacity pro první vjezd/výjezdu jsou uvedeny v tab. 3.8. Jedná se o data získaná dopravním průzkumem na konkrétní okružní křižovatce.

Tab. 3.8: Intenzity vozidel na vjezdu, výjezdu a okružním páse pro výpočet vjezdu 1.

vjezd	Q_k [jv/h]	Q_a [jv/h]	Q_e [jv/h]
1	174	493	426

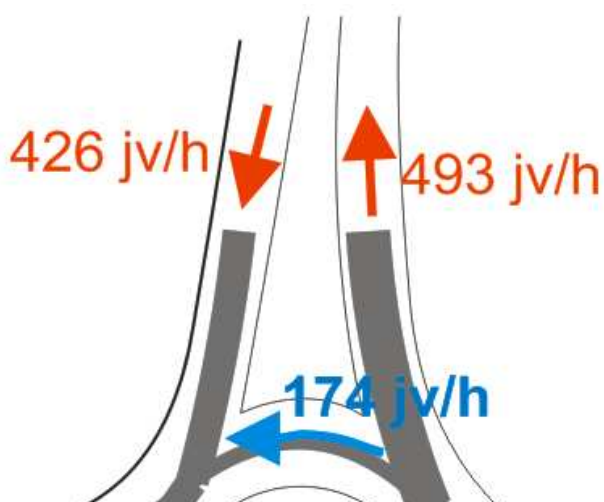
Q_a - intenzita vozidel na výjezdu [jv/h]

Q_k - intenzita vozidel na vozovce okružního pásu [jv/h]

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h]

Kapacita vjezdu konkrétní okružní křižovatky

Intenzity ovlivňující výpočet pro první vjezd jsou znázorněny graficky na obr. č. 3.4. Síla čáry vyjadřuje intenzitu v daném dopravním proudu, dále je obrázek doplněn o popisky s konkrétní intenzitou dopravního proudu.



Obr. č. 3.4: Intenzity zatěžující vjezd 1

Z Obr. č. 2.6: Graf pro zjištění faktoru α [1]. na str. 21 je na základě rozměrových parametrů dané křižovatky odečten faktor $\alpha = 0,3$

Maximální hodnoty kapacity L_e jednoho vjezdu za předpokladu známých hodnot zatížení vjezdu jsou určeny na základě vztahu (2.1):

$$L_e = 1500 - \frac{8}{9} * (Q_k + \alpha * Q_a) = 1500 - \frac{8}{9} * (174 + 0,3 * 493) = 1214 \text{ jv/h} \quad (3.7)$$

Kapacita prvního vjezdu dané okružní křižovatky je 1214 jednotkových vozidel za hodinu.

Stupeň vytížení okružní křižovatky

Stupeň vytížení vjezdu je stanoven dle vztahu (2.2):

$$ALG_e = \frac{Q_e}{L_e} \cdot 100 = \frac{426}{1214} \cdot 100 = 35\% \quad (3.8)$$

První vjezd je při aktuálních intenzitách dopravních proudů vytížen na 35 %.

Rezerva kapacity

Rezerva kapacity pro vjezd 1 se stanoví ze vztahu (2.3):

$$R = L_e - Q_e = 1214 - 426 = 788 \text{ jv/h} \quad (3.9)$$

Čekací doba

Se vypočte dle vztahů podle Kimber/Holise (2.4):

$$t_w = \frac{2000 + 2 \cdot Q_k}{L_e - Q_e} = \frac{2000 + 2 \cdot 174}{1214 - 426} = 2,98s \quad (3.10)$$

Průměrná doba čekání na prvním vjezdu okružní křižovatky je 2,98s.

Délka čekající fronty

Délka čekající fronty (L) se vypočte ze střední čekací doby t_w [s] takto z následujícího vztahu (2.5):

$$L = \frac{Q_e \cdot t_w}{3600} \cdot L_{voz} = \frac{426 \cdot 2,98}{3600} \cdot 6 = 2,12m \quad (3.11)$$

Průměrná délka čekající fronty před vjezdem 1 je 2,12 m.

Pro ostatní vjezdy proběhl výpočet analogicky jako pro zde uvedený vjezd 1. Výsledky kapacitního výpočtu dle metodiky technických podmínek pro projektování okružních křižovatek na silnicích a místních komunikací TP 135 jsou uvedeny v tab. 3.9.

Tab. 3.9: Kapacitní výpočet dle metodiky TP 135.

vjezd	Q_k [jv/h]	Q_a [jv/h]	Q_e [jv/h]	α	L_e [jv/h]	ALG [%]	R [jv/h]	t_w [s]	L_{front} [m]
1	174	493	426	0,3	1214	35,09	788	2,98	2,12
2	342	228	168	0,3	1135	14,80	967	2,78	0,78
3	136	378	485	0,3	1278	37,94	793	2,86	2,32
4	405	174	194	0,3	1094	17,74	900	3,12	1,01

Q_a - intenzita vozidel na výjezdu [jv/h]

Q_e - intenzita vozidel na vjezdu [jv/h]

Q_k - intenzita vozidel na vozovce okružního pásu [jv/h]

L_e – kapacita jednoho vjezdu [jv/h]

ALG – stupeň vytížení vjezdu [%]

α – faktor α – zohledňuje geometrické poměry vjezdu [-]

L_{front} – průměrná délka čekající fronty [m]

t_w – průměrná doba čekání [s]

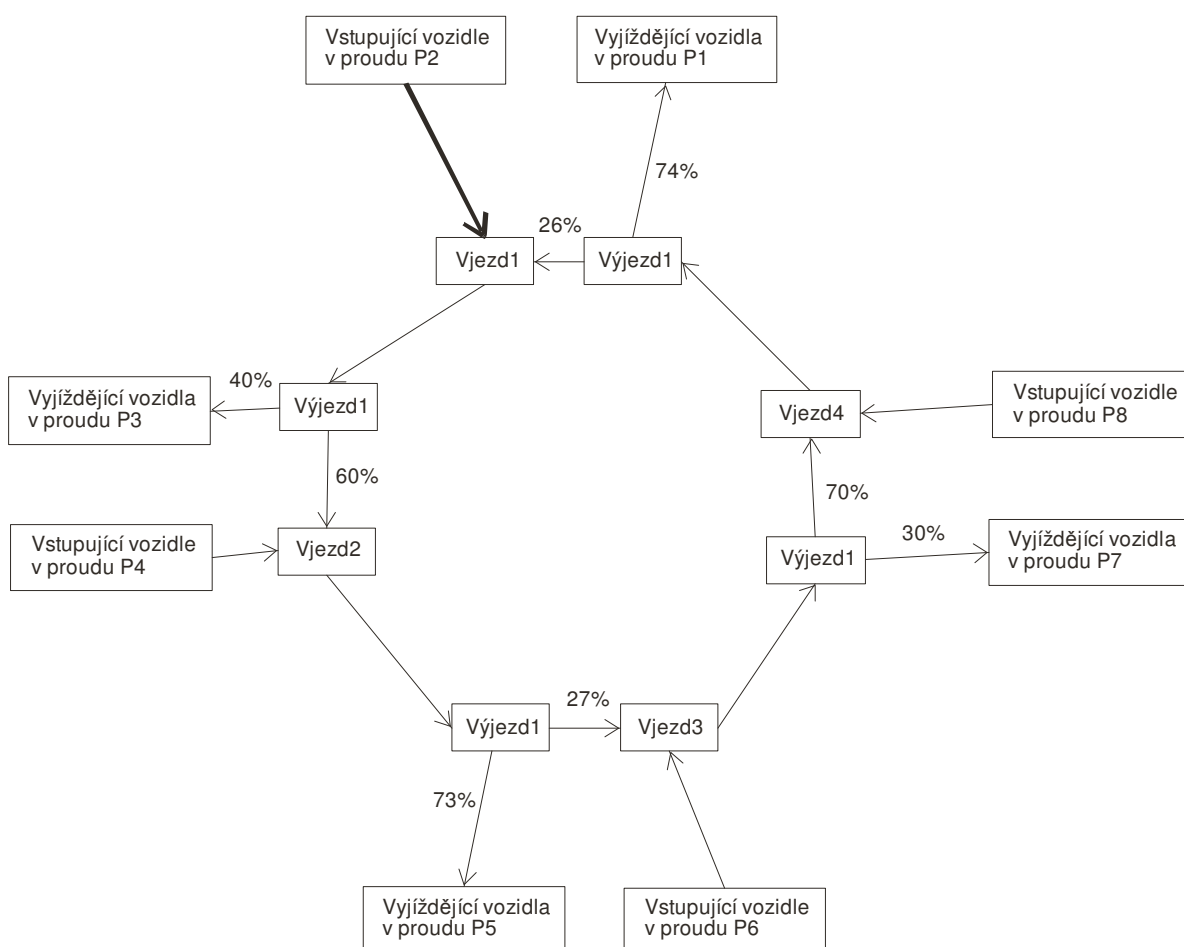
R – rezerva kapacity [jv/h]

4 Tvorba simulačního modelu

Po ukončení výše zmíněných fází se přistupuje k samotné tvorbě, tedy implementaci simulačního modelu, která je spojena zejména s navrhováním a implementací vhodných datových struktur. Jak již bylo zmíněno výše implementačním prostředím pro model okružní křižovatky je software Witness.

4.1 Konceptce simulačního modelu

Před zahájením samotného modelování je třeba pochopit a definovat všechny děje, které na okružní křižovatce nastávají. Při simulaci je nutné zohlednit rozměrové parametry zvolené okružní křižovatky. Dále je třeba zohlednit rychlost projíždějících vozidel a intenzity vstupních dopravních proudů. V simulačním modelu je třeba zahrnout přednost vozidel pohybujících se po okružním páse před vozidly přijíždějícími k okružní křižovatce. Schematické znázornění modelu okružní křižovatky je na obr. č. 4.1.



Obr. č. 4.1: Schematické znázornění modelu okružní křižovatky.

4.2 Struktura simulačního modelu

Struktura simulačního modelu se skládá ze tří základních prvků: entit (objektů), aktivit (činností) a zdrojů [7].

Entity (objekty)

Entity jsou dynamické prvky, které se pohybují systémem. V určitém okamžiku do systému vstoupí a jsou na nich realizovány určité aktivity (činnosti). Přitom si alokují nebo spotřebovávají určité zdroje. Po čase systém opouští.

Příkladem entity je vozidlo, které přijíždí na vjezd okružní křižovatky a chce projet okružní křižovatkou k určitému výjezdu. Požaduje tedy určitou aktivitu a k tomu si alokuje zdroj – určitý vjezd a výjezd. Po projetí okružní křižovatkou od určitého vjezdu k určitému výjezdu vozidlo opouští okružní křižovátku [3].

Aktivity (činnosti)

Aktivity označují dále nedělitelné prvky systému, které ovládají pohyb entit.

Příkladem aktivity je průjezd vozidla určitým vjezdem okružní křižovatky [3].

Zdroje

Zdroje jsou prvky, které jsou entitami po určitý čas využívány nebo spotřebovávány. Každý zdroj má svou kapacitu. Pokud entita vyžaduje určitý zdroj, který není momentálně dostupný, staví se entita do *fronty*.

Příkladem zdroje je vjezd okružní křižovatky. Vozidlo (entita), které projíždí okružní křižovatkou (aktivita), využívá vjezd, výjezd a jízdu po okružním páse. Žádné jiné vozidlo je nemůže využít ve stejném okamžiku [3].

4.3 Popis programu Witness

WITNESS je nástrojem pro simulaci a optimalizaci výrobních, obslužných a logistických systémů vyvinutý britskou společností Lanner Group. Využívá se hlavně v oblasti produktů pro interaktivní simulaci systémů diskrétních událostí, které jsou postaveny na organizaci fyzických a logických elementů, jejich významné konfiguraci na časové ose [12].

Základní prvky modelu v software Witness

- PARTS - *součásti* - Součásti procházející daným modelem. Mohou reprezentovat fyzické součástky a výrobky, dokumenty obíhající ve velké firmě nebo třeba vozidla pohybující se po okružní křižovatce.[12]
- BUFFERS - *zásobníky* - Místa, kde lze skladovat *součásti*. Typickým případem jsou lidé ve frontě nebo vozidla ve frontě před vjezdem do okružní křižovatky [12].
- MACHINES - *stroje* - elementy schopné reprezentovat cokoli, co někde odebírá *součásti*, zpracovává je a předává je dál. Vrtačka, lis ale také telefonistka, vjezd do okružní křižovatky, nebo dokonce celý výrobní závod může být reprezentován jediným strojem [12].
- CONVEYOR – *dopravníky* - jsou jedním z prostředků pro modelování dopravy materiálu. Dopravníky mohou být buď pevné (jako např. pásový dopravník) nebo akumulující (jako např. válečkový dopravník). Dalšími charakteristikami je délka dopravníku (vyjádřená jako počet součástí, které lze na dopravník uložit současně), čas potřebný pro posun o jednu pozici a charakteristiky poruch a oprav [12].

4.4 Objekty, činnosti a zdroje zahrnuté v modelu

V této podkapitole jsou uvedeny jednotlivé prvky, se kterými se v dalších kapitolách pracuje.

Objekty

V následujících odrážkách jsou vyjmenovány a stručně popsány objekty vystupující v modelu okružní křižovatky.

- „Vozidlo1“ – vozidlo s požadavkem na „vjezd1“
- „Vozidlo2“ – vozidlo s požadavkem na „vjezd2“
- „Vozidlo3“ – vozidlo s požadavkem na „vjezd3“
- „Vozidlo4“ – vozidlo s požadavkem na „vjezd4“

Zdroje

V následujících odrážkách jsou vyjmenovány a stručně popsány zdroje vystupující v modelu okružní křižovatky.

- „*Vjezd1*“ až „*Vjezd4*“ – představují jednotlivé vjezdy do okružní křižovatky, každý vjezd může obsluhovat maximálně jedno vozidlo najednou.
- „*Vyjezd1*“ až „*Vyjezd4*“ - představují jednotlivé výjezdy z okružní křižovatky, každý výjezd může obsluhovat maximálně jedno vozidlo najednou.
- „*Jizda12*“ - představuje jízdu mezi prvním vjezdem a druhým výjezdem. Zohledňuje rozměrové parametry křižovatky.
- „*Jizda22*“ - představuje jízdu mezi druhým vjezdem a třetím výjezdem. Zohledňuje rozměrové parametry křižovatky.
- „*Jizda32*“ - představuje jízdu mezi třetím vjezdem a čtvrtým výjezdem. Zohledňuje rozměrové parametry křižovatky.
- „*Jizda42*“ - představuje vzdálenost, tedy jízdu mezi čtvrtým vjezdem a prvním výjezdem. Zohledňuje rozměrové parametry křižovatky.
- „*Fronta1*“ až „*Fronta4*“ – představuje frontu vozidel před určitým vjezdem okružní křižovatky. Uplatňuje se řádný frontový režim.

Činnosti

V následujících odrážkách jsou vyjmenovány a stručně popsány činnosti vystupující v modelu okružní křižovatky:

- Průjezd vozidla příslušným vjezdem – každé vozidlo vstupující do systému prochází příslušnou frontou a pokud je mu umožněn vjezd do okružní křižovatky je, obsluhováno příslušným vjezdem.

- Jízda vozidla po okružním páse – každé vozidlo pohybující se po okružní křižovatce pokračuje po projetí vjezdu na příslušný dopravník představující jízdu po okružním páse.
- Průjezd výjezdem – každé vozidlo projíždí příslušným výjezdem okružní křižovatky, v tomto výjezdu je vozidlo buď odesláno ven z křižovatky (opouští model okružní křižovatky) nebo může pokračovat v jízdě po okružní křižovatce.

4.5 Funkce simulačního modelu

V této kapitole je vysvětlení funkce simulačního modelu okružní křižovatky sestaveného v simulačním jazyce Witness. Z důvodu velkého rozsahu zde neuvádím veškeré přepisy, ale pouze ukázky se stručným komentářem.

Funkce simulačního modelu je popsána pro vjezd1/výjezd1, ostatní vjezdy a výjezdy jsou řešeny analogicky.

V modelu dále vystupují pomocné proměnné pro potřeby simulace, jedná se například o záznam počtu projetých vozidel, sledování průměrné délky fronty, proměnné potřebné pro zápis hodnot do excelu atd.

Vozidlo1

Je entita, která aktivně vstupuje do modelu okružní křižovatky. Počet přijíždějících vozidel za do systému za jednotku času se řídí Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti, jehož parametry byly zjištěny v kapitole analýza vstupních údajů pro potřeby simulace. Entita vozidlo1 představuje vozidla přijíždějící k okružní křižovatce k prvnímu vjezdu, tedy vozidla dopravního proudu P2.

V simulačním software Witness je příchod vozidel určen časovou mezerou mezi příchody, tedy pro „vozidlo“1 *NEGEXP (0,14)*.

Pro ostatní vstupující vozidla do okružní křižovatky je příjezd vozidel řešen analogicky jako pro „vozidlo1“.

Fronta1

Zásobník s názvem „fronta1“ představuje frontu čekajících vozidel před strojem „vjezd1“. Po vytvoření entity „vozidlo1“ postupuje toto vozidlo do zásobníku „fronta1“. Z fronty je vozidlo vytaženo strojem „vjezd1“, pokud to umožňují podmínky, které budou blíže specifikovány při popisu prvku „vjezd1“. Ve frontě je uplatňován řádný frontový režim. Na prvku „fronta1“ také probíhá záznam průměrné délky čekající fronty a záznam průměrného času stráveného vozidly čekáním ve frontě. Fronty před ostatními vjezdy plní stejnou funkci jako „fronta1“ a jsou řešeny analogicky.

Vjezd1

Objekt „Vjezd1“ simuluje jeden konkrétní vjezd na okružní křižovatce. Do stroje „vjezd1“ vstupují entity jednak ze zásobníku „fronta1“ (vozidla vstupující do systému), ale také vozidla, která neopustila systém na stroji „vyjezd1“ a tedy pokračují v jízdě po okružní křižovatce. Vozidlům která pokračují v jízdě po okružní křižovatce musí být umožněn nerušený průjezd strojem „Vjezd1“.

Vozidla, která přijíždí ke stroji „vjezd1“ ze zásobníku „fronta1“ jsou v obsluze vjezdu 2s, tato doba zohledňuje dynamické parametry vozidel, čas potřebný pro řazení do okružního pásu křižovatky, případně rozjezd vozidla, pokud bylo nuceno před vjezdem zastavit. Vozidla, která přijíždí do vjezdu1 po okružním páse jsou v tomto vjezdu obsluhováni 2s. Tento čas představuje čas, po který je vjezd blokován vozidlem projíždějícím po okružním páse, je kratší než čas vjezdu pro vozidla přijíždějící z fronty jelikož vozidlo projíždějící po okružním páse má umožněn nerušený průjezd (nepředpokládá se, že by se muselo rozjíždět a řadit na okružní pás).

Podmínka pro výběr vstupního vozidla pro „vjezd1“:

IF NPARTS (V1) = 1

PULL from V1

ELSEIF NPARTS (V1) = 0 AND pokračuje (1)= 0 AND NPARTS (jizda12) =0

PULL from Fronta1

ELSE

Wait

ENDIF

Zde zobrazená podmínka zajišťuje přednost vozidla pokračujícího po okružním páse před vozidlem vstupujícím do okružní křižovatky ze zásobníku „fronta1“.

Proměnná „pokracuje(1)“ zajišťuje informaci o tom, zda se na sledovaném úseku nachází vozidlo, které bude pokračovat v jízdě po okružním páse (má tedy atribut „pok1“ = 1) přes stroj „vjezd1“ a má tedy přednost před vozidly přijíždějícími ze zásobníku „fronta1“. Pokud je proměnná „pokracuje(1)“ > 0, pak je na sledovaném úseku vozidlo, které pokračuje v jízdě po okružním páse a je mu umožněn přednost ve stroji „vjezd1“. Pokud má přijíždějící vozidlo atribut „pok1“ = 1 je proměnná „pokracuje1“ na začátku dopravníku „jizdana42“ navýšena o hodnotu 1, jakmile toto vozidlo projede strojem „vjezd1“ je hodnota proměnné „pokracuje(1)“ opět snížena o hodnotu 1 a strojem „vjezd1“ mohou projíždět vozidla ze zásobníku „fronta1“.

Dále je zde předpoklad, že na stroji „vjezd1“ a dopravníku „jizda12“ je prostor pouze pro jedno vozidlo.

Jízda12

Dopravník „jízda12“ představuje jízdu po okružním páse křižovatky mezi stroji „vjezd1“ a „vyjezd2“. Dopravník „jízda12“ zohledňuje rozměrové parametry dané okružní křižovatky. Dopravník „jízda12“ má kapacitu jedno vozidlo a simuluje dobu jízdy mezi stroji „vjezd1“ a „vyjezd2“, tato doba je 2s. Při vstupu vozidla na dopravník „jízda12“ je rozhodováno o tom zda, dané vozidlo na stroji „vyjezd2“ opustí okružní křižovatku nebo bude po okružním páse pokračovat k jinému výjezdu z křižovatky. Počet pokračujících a opouštějících vozidel je určen poměrem, který vychází z dopravního průzkumu. U dopravníku „jízda12“ 74% vozidel pokračuje v jízdě po okružním páse křižovatky a 26% vozidel křižovatku opouští křižovatku na stroji „vyjezd2“, v tomto poměru je generován rozdělením atribut „pok2“ a nabývá hodnot 1 nebo 0. Pokud je atribut „pok2“ roven 1, pak vozidlo pokračuje v jízdě po okružní křižovatce, pokud je atribut „pok2“ roven 0, vozidlo na stroji „vyjezd2“ opouští okružní křižovatku.

Generování atributu „pok2“:

pok (2) = rozdeleni2 ()

IF pok (2) = 1

pokracuje (2) = pokracuje (2) + 1

ENDIF

Dále je na dopravníku „jízda12“ navyšována hodnota proměnné „pokracuje(2)“. Pokud má vozidlo hodnotu atributu „pok (2) = 1“. Tím je zajištěno, aby před vozidlo, které pokračuje po okružní křižovatce, již nevjíždělo vozidlo na následujícím vjezdu, které by ho mohlo blokovat. Vozidlo opouštějící křižovatku na následujícím výjezdu dává znamení o změně směru jízdy a neovlivňuje tedy najíždění vozidel na následujícím vjezdu. Toto je zajištěno proměnnou „pokracuje(2)“, která má nulovou hodnotu, pokud se na sledovaném úseku nenachází vozidlo s atributem „pok2“ = 1. Sledovaný úsek je jízda před konkrétním vjezdem.

Výjezd1

Na stroji „vyjezd1“ jsou vozidla, která opouští okružní křižovatku, odeslána z modelu a vozidla, která pokračují po okružním páse, jsou bez prodlevy odkázána na „vjezd1“. Jak již bylo zmíněno výše, vozidla jsou rozdělována poměrově na základě dopravního pruhu. Rozhodnutí o tom, zda určité vozidlo opustí okružní křižovatku nebo bude pokračovat v jízdě po okružním páse, se provádí již na příslušném dopravníku.

Vstupní pravidlo na stroji „vyjezd1“

IF pok (1) = 1

PUSH to V1

ELSEIF pok (1) = 0

PUSH to SHIP

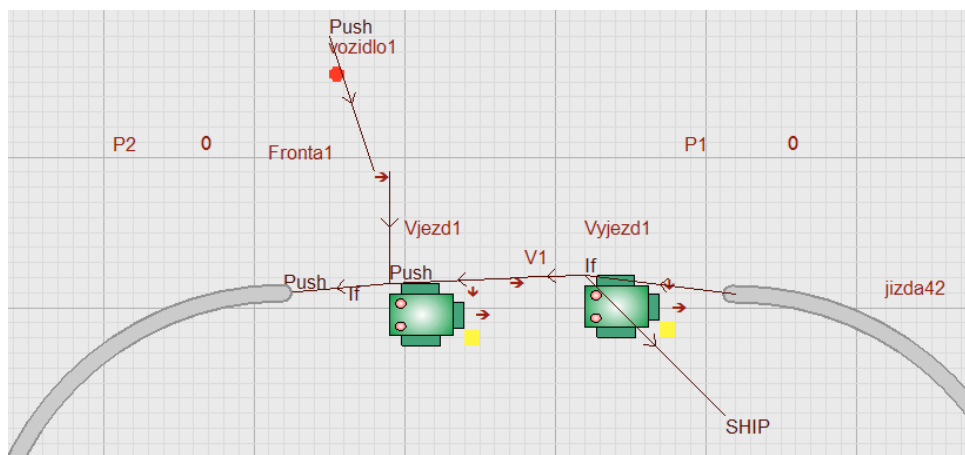
ELSE

Wait

ENDIF

Zobrazení vjezdu1 a výjezdu1 v software Witness

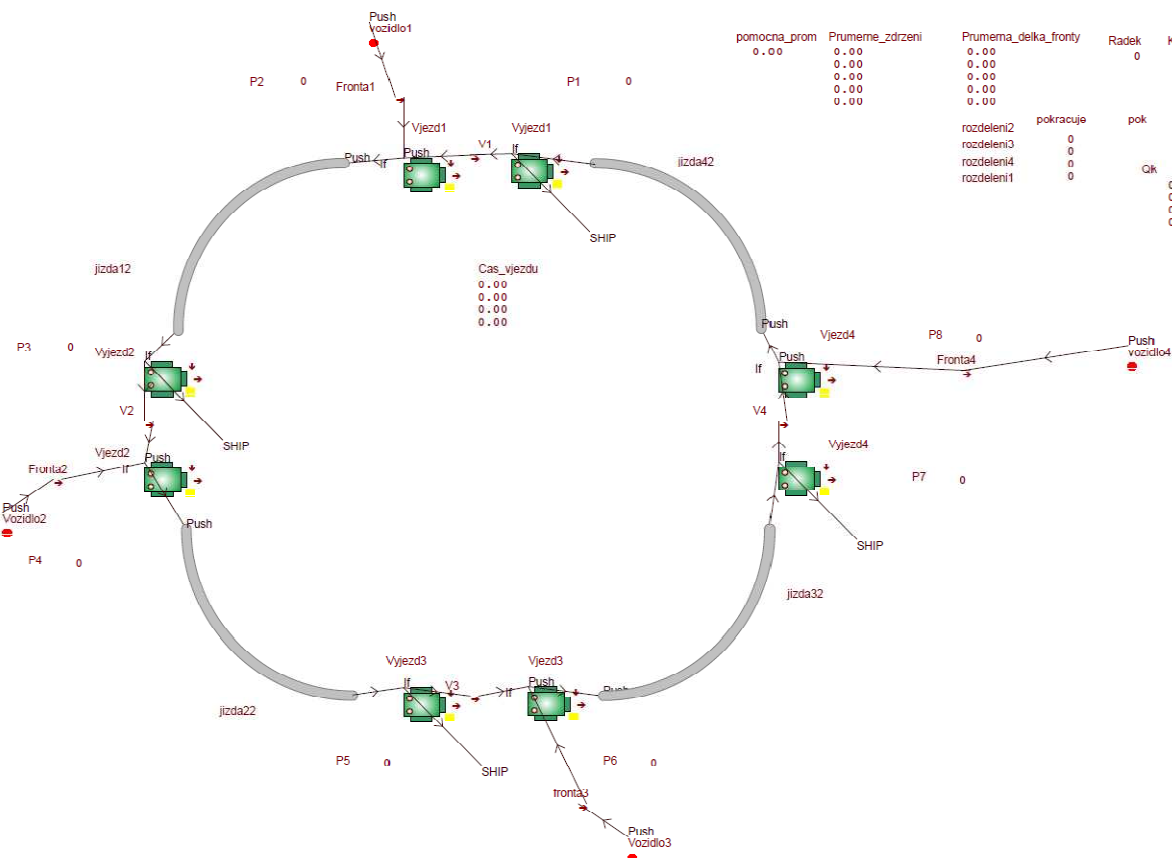
Na obr. č. 4.2 je znázorněn vjezd1 a výjezd1 modelované okružní křižovatky v prostředí software Witness.



Obr. č. 4.2: Vjezd1 a výjezd1 modelované okružní křižovatky v prostředí software Witness

Zobrazení celého modelu okružní křižovatky v software Witness

Na obr. č. 4.3 je znázorněn celý model modelované okružní křižovatky v prostředí software Witness.



Obr. č. 4.3: Celý model modelované okružní křižovatky v prostředí software Witness.

4.6 Verifikace a validace modelu

Verifikace byla provedena vizuální kontrolou, zda se model chová dle předpokladů. Protože modelovaný systém je reálným existujícím systémem, byla pro validaci zvolena nejjednodušší cesta, a to porovnání empirických dat s výsledky simulačních experimentů.

S modelem okružní křižovatky bylo provedeno 10 simulačních běhů s různými proudy pseudonáhodných čísel.

Statistické zpracování výsledků simulace

Na souboru dat získaného simulačním experimentem byly provedeny intervalové odhady. Pro každý výstupní proud z okružní křižovatky byly spočteny 95-ti% intervaly spolehlivosti pro počet vyjíždějících vozidel.

Výpočet byl proveden v excelu a výsledky jsou v

tab. 4.1.

Příklad výpočtu pro dopravní proud P1:

Výpočet průměrné intenzity v dopravním proudu P1:

$$\bar{x} = \frac{435 + 465 + \dots + 472}{10} = 457,2 \text{ jv/h} \quad (4.1)$$

Řešení v excelu:

$$\bar{x} = \text{PRŮMĚR}(435:472) = 457,2$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{(435 - 457,2)^2 + \dots + (472 - 457,2)^2}{9}} = 17,3 \text{ jv/h} \quad (4.2)$$

Řešení v excelu:

$$s = \text{SMODCH.VÝBĚR}(435:472) = 17,3$$

Příslušnou hodnotu kvantilu Studentova rozdělení můžeme odečíst ze statistických tabulek, nebo vypočítat pomocí funkce v excelu:

$$t_{1-\alpha/2; n-1} = \text{TINV}(0,05;9) = 2,26$$

Výpočet dolní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_d = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2; n-1} = 457,2 - \frac{17,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 444,8 \text{ jv/h} \quad (4.3)$$

Výpočet horní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_h = \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} = 457,2 + \frac{17,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 469,6 \text{ jv/h} \quad (4.4)$$

Tab. 4.1: Výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro výstupní proudy.

	Dopravní proud			
Pokus	P1 [jv/h]	P3 [jv/h]	P5 [jv/h]	P7 [jv/h]
1	435	240	362	196
2	465	227	415	183
3	429	228	396	195
4	466	244	363	174
5	470	245	365	196
6	434	245	398	179
7	461	231	366	176
8	473	248	367	191
9	467	240	392	164
10	472	287	387	197
\bar{x}	457,2	243,5	381,1	185,1
s	17,3	17,0	18,8	11,6
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,26	2,26	2,26	2,26
T_d	444,8	231,3	367,6	176,8
T_h	469,6	255,7	394,6	193,4

Z

tab. 4.1 vyplývá, že počet vozidel v dopravním proudu P1 je s pravděpodobností 0,95 v intervalu (444,8;469,6), počet vozidel v dopravním proudu P3 je s pravděpodobností 0,95 v intervalu (231,3;255,7), počet vozidel v dopravním proudu P5 je s pravděpodobností 0,95 v intervalu (367,6;394,6) a počet vozidel v dopravním proudu P7 je s pravděpodobností 0,95 v intervalu (176,8;193,4).

Analogicky je proveden výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro dopravní proudy pohybující se po okružním páse, tedy pro dopravní proudy Q1-Q7. Výpočet je proveden v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro dopravní proudy pohybující se po okružním páse.

	Dopravní proud			
Pokus	Q1 [jv/h]	Q2 [jv/h]	Q3 [jv/h]	Q4 [jv/h]
1	172	341	134	423
2	210	370	129	457
3	173	367	133	415
4	148	335	145	443
5	175	365	144	435
6	170	345	121	421
7	141	350	132	413
8	179	357	149	440
9	162	364	153	464
10	187	365	147	446
\bar{x}	171,7	355,9	138,7	435,7
s	19,3	12,3	10,3	17,5
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,26	2,26	2,26	2,26
T_d	157,9	347,1	131,3	423,2
T_h	185,5	364,7	146,1	448,2

Porovnání výsledků získaných simulací a dat získaných dopravním průzkumem je uvedeno v tab. 4.3 a tab. 4.4.

Tab. 4.3: Porovnání intenzit výstupních dopravních proudů získaných simulací a intenzit z dopravního průzkumu.

Dopravní proud	Průzkum [jv/h]	Simulace [jv/h]	Odchylka [%]
P1	493	457,2	-7,3
P3	228	243,5	6,8
P5	378	381,1	0,8
P7	174	185,1	6,4

Tab. 4.4: Porovnání počtu vozidel pokračujících po okružním páse získaných simulací a počtu vozidel z dopravního průzkumu.

Dopravní proud	Průzkum [jv/h]	Simulace [jv/h]	Odchylka [%]
Q1	174	171,7	-1,3
Q2	342	355,9	4,1
Q3	136	138,7	2,0
Q4	405	435,7	7,6

Absolutní shodu dat reálného systému a vytvořeného modelu nelze nikdy očekávat. Ve všech případech je odchylka v rozmezí $\pm 10\%$, model byl tedy prohlášen za validní.

Pro validaci vytvořeného modelu okružní křižovatky byl proveden doplňující dopravní průzkum. V tomto průzkumu byl zaznamenán u 30 vozidel čas strávený průjezdem křižovatkou. Tento doplňkový průzkum je uveden v příloze E diplomové práce. Z tohoto dopravního průzkumu byl vypočten průměrný čas strávený vozidly průjezdem křižovatkou a porovnán s průměrným časem potřebným pro průjezd modelem okružní křižovatky. Průměrné časy průjezdu jsou porovnány v tab. 4.5.

Tab. 4.5: Porovnání průměrného času vozidel stráveného průjezdem křižovatkou z dopravního průzkumu a průměrného času průjezdu křižovatkou v modelu

	Průzkum	Simulace	Odchylka [%]
Průměrný čas průjezdu [s]	7,6	8,4	8,5

Odchylka průměrného času vozidel stráveného průjezdem křižovatkou z dopravního průzkumu a průměrného času průjezdu křižovatkou v modelu je do 10% a vytvořený model lze tedy považovat za validní a za správně formálně zapsaný.

5 Provedené experimenty a jejich vyhodnocení

Simulací budou provedeny experimenty zaměřené na zkoumání vlivu charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a na průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním. Dále budou provedeny experimenty zaměřené na porovnání výsledků simulace s výsledky výpočtu dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek TP 135.

5.1 Vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty a na průměrné zdržení vozidel čekáním

Pro zkoumání vlivu parametru vstupního toku na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a průměrnou dobu čekání vozidel bude nahrazeno exponenciální rozdělení pravděpodobnosti u časových mezer mezi vstupy vozidel do systému Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti.

Erlangovo rozdělení pravděpodobnosti je rozdělení spojitého typu definované dvěma parametry:

- k - počet událostí (parametr tvaru)
- λ - rychlost výskytu těchto událostí (parametr měřítka)

Při experimentech bude střední hodnota vstupujících vozidel za jednotku času konstantní, bude se měnit parametr tvaru k .

Provedení experimentů s Erlangovým rozdělením pravděpodobnosti

Při prováděných experimentech bude použita střední hodnota mezery mezi příjezdy vozidel získaná při dopravním průzkumu. Experimenty budou provedeny pro $k=1..10$ a výsledky experimentů budou znázorněny v tabulce a graficky. Pro každou hodnotu parametru k , bylo provedeno 10 simulačních běhů s různými proudy pseudonáhodných čísel a výsledky zpracovány tabelárně a graficky. Vliv parametru k , na délku fronty je zpracován v tab. 5.3 a obr. č. 5.1.

Z výsledků simulací byly spočteny 95-ti% intervaly spolehlivosti pro délku fronty čekajících vozidel a pro čas strávený čekáním, výsledky jsou uvedeny v

tab. 5.2. Výpočty byly provedeny pro jednotlivé dopravní proudy a pro parametry $k = 1-10$, pro příklad uvádím výpočet 95-ti% intervaly spolehlivosti pro délku fronty čekajících vozidel pro $k=1$ v tab. 5.1. Výpočet byl proveden v excelu. Příklad pro dopravní proud P2.

Výpočet průměrné délky fronty:

$$\bar{x} = \frac{1,81 + 2,08 + \dots + 2,65}{10} = 2,25m \quad (5.1)$$

Výpočet pomocí funkce v excelu:

$$\bar{x} = \text{PRŮMĚR}(1,81:2,64)=2,25$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{(1,81 - 2,25)^2 + \dots + (2,65 - 2,25)^2}{9}} = 0,3m \quad (5.2)$$

Směrodatná odchylka pomocí funkce v excelu:

$$s = \text{SMODCH.VÝBĚR}(1,81:2,64)=0,3$$

Příslušnou hodnotu kvantilu Studentova rozdělení můžeme odečíst ze statistických tabulek, nebo vypočíst pomocí funkce v excelu:

$$t_{1-\alpha/2;n-1} = \text{TINV}(0,05;9)=2,26$$

Výpočet dolní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_d = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} = 2,25 - \frac{0,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 2m \quad (5.3)$$

Výpočet horní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_h = \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} = 2,25 + \frac{0,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 2,5m \quad (5.4)$$

Tab. 5.1: Výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro průměrnou délku fronty.

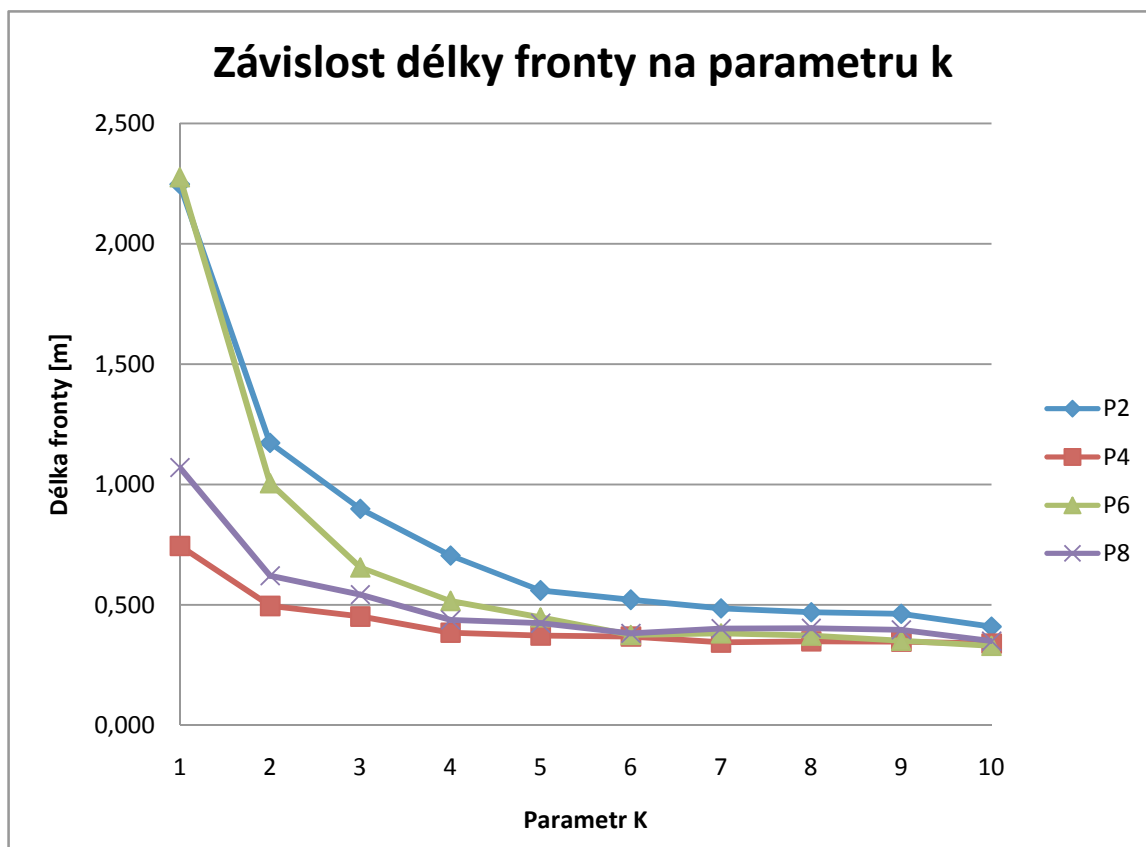
	Délka fronty [m]			
Pokus	P2	P4	P6	P8
1	1,81	0,68	2,10	0,71
2	2,08	0,71	2,40	1,32
3	1,98	0,72	2,11	0,69
4	2,05	0,81	2,78	1,05
5	2,70	0,69	2,17	1,08
6	2,26	0,89	2,28	0,87
7	2,43	0,71	2,09	0,92
8	2,60	0,71	2,44	1,47
9	1,92	0,70	2,20	1,14
10	2,65	0,82	2,20	1,44
\bar{x}	2,25	0,74	2,28	1,07
s	0,3	0,1	0,2	0,3
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,26	2,26	2,26	2,26
T_d	2,0	0,7	2,1	0,9
T_h	2,5	0,8	2,4	1,3

Tab. 5.2: Výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro průměrnou délku fronty a průměrný čas zdržení pro všechny dopravní proudy a $k=1-10$.

		Průměrné zdržení [s]				Průměrná délka fronty [m]			
		Dopravní proud				Dopravní proud			
k		P2	P4	P6	P8	P2	P4	P6	P8
1	T_d	2,85	2,55	2,63	2,77	2,01	0,69	2,12	0,87
	T_h	3,42	2,87	3,02	3,80	2,48	0,79	2,43	1,27
2	T_d	1,37	1,53	1,16	1,57	0,96	0,44	0,93	0,52
	T_h	1,91	1,94	1,35	2,27	1,39	0,55	1,08	0,72
3	T_d	1,07	1,40	0,72	1,40	0,76	0,40	0,58	0,46
	T_h	1,45	1,70	0,92	1,90	1,04	0,50	0,74	0,63
4	T_d	0,84	1,20	0,60	1,23	0,60	0,35	0,48	0,40
	T_h	1,13	1,47	0,68	1,47	0,81	0,42	0,55	0,48
5	T_d	0,70	1,15	0,52	1,16	0,49	0,32	0,42	0,37
	T_h	0,88	1,48	0,60	1,46	0,63	0,42	0,48	0,48
6	T_d	0,64	1,11	0,43	1,03	0,45	0,31	0,34	0,34
	T_h	0,82	1,49	0,51	1,32	0,59	0,42	0,41	0,43
7	T_d	0,63	1,09	0,42	1,11	0,45	0,30	0,34	0,36
	T_h	0,73	1,35	0,53	1,36	0,52	0,39	0,43	0,45
8	T_d	0,60	1,10	0,40	1,05	0,43	0,31	0,33	0,35
	T_h	0,72	1,38	0,52	1,44	0,51	0,39	0,42	0,46
9	T_d	0,60	1,13	0,40	1,11	0,43	0,32	0,32	0,36
	T_h	0,70	1,34	0,47	1,33	0,50	0,38	0,38	0,43
10	T_d	0,51	1,14	0,36	0,97	0,36	0,32	0,29	0,32
	T_h	0,64	1,27	0,46	1,18	0,46	0,36	0,37	0,38

Tab. 5.3: Vliv parametru k na délku fronty v jednotlivých proudech.

Průměrná délka fronty [m]										
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P2	2,247	1,173	0,899	0,705	0,560	0,521	0,486	0,470	0,463	0,410
P4	0,745	0,496	0,452	0,384	0,373	0,368	0,344	0,349	0,347	0,339
P6	2,277	1,005	0,656	0,515	0,448	0,376	0,382	0,372	0,351	0,330
P8	1,070	0,621	0,542	0,438	0,424	0,382	0,402	0,403	0,396	0,349



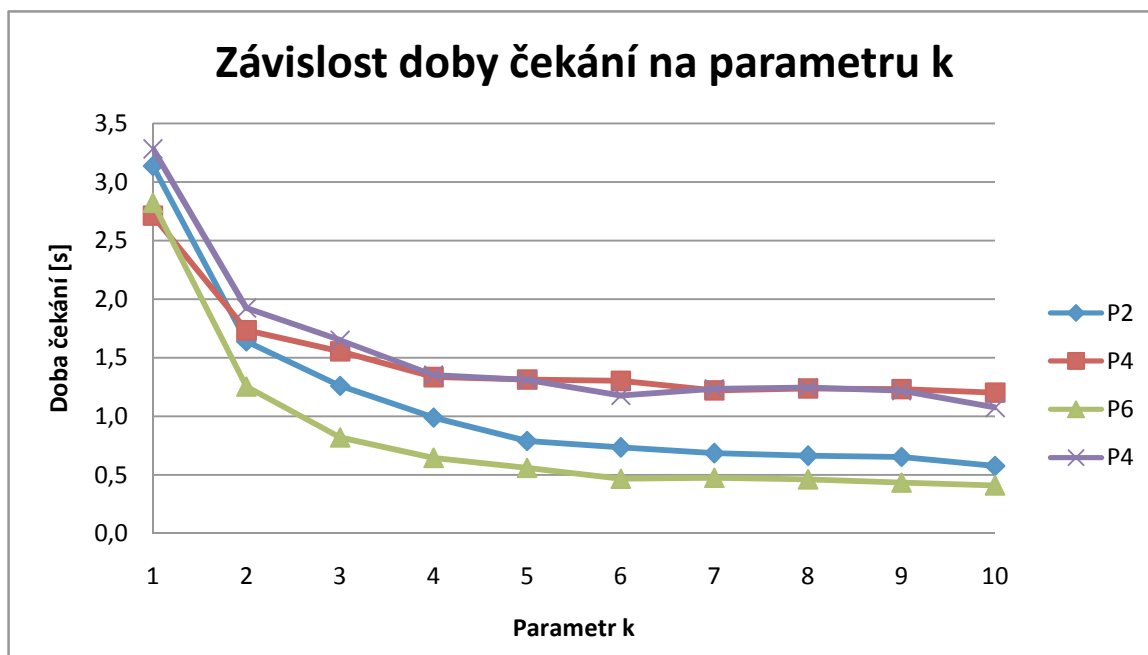
Obr. č. 5.1: Vliv parametru k, na délku fronty.

Z tab. 5.3 a obr. č. 5.1 je patrný vliv parametru k na délku fronty čekajících vozidel před jednotlivými vjezdy okružní křižovatky. Se vzrůstajícím parametrem k, se zmenšuje délka fronty.

Vliv parametru k na dobu čekání vozidel ve frontě je zpracován v tab. 5.4 a obr. č. 5.2.

Tab. 5.4: Vliv parametru k na dobu čekání

Průměrná doba čekání ve frontě [s]										
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P2	3,136	1,639	1,258	0,989	0,790	0,734	0,684	0,662	0,653	0,577
P4	2,713	1,734	1,553	1,335	1,314	1,301	1,220	1,238	1,231	1,202
P6	2,822	1,254	0,819	0,643	0,559	0,467	0,475	0,460	0,434	0,408
P8	3,282	1,923	1,649	1,352	1,309	1,177	1,234	1,245	1,219	1,075



Obr. č. 5.2: Vliv parametru k na dobu čekání

Vyhodnocení vlivu charakteru vstupního toku vozidel

Použití Erlangova rozdělení se zvyšujícím se parametrem k má zásadní vliv na délku fronty čekajících vozidel a na dobu čekání vozidel ve frontě. Se zvyšujícím se parametrem k (časové mezery mezi vstupy vozidel se blíží konstantě) se snižuje délka fronty čekajících vozidel a také se zmenšuje doba čekání vozidel ve frontě.

5.2 Porovnání výsledků simulace s kapacitním výpočtem okružní křižovatky

Pro porovnání výsledků simulace s kapacitním výpočtem dle TP135 byl proveden experiment o deseti pokusech s různými proudy pseudonáhodných čísel. Byly stanoveny 95-ti% intervaly spolehlivosti pro průměrnou délku fronty a pro průměrné zdržení vozidel čekáním. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v

tab. 5.5. Výpočty byly provedeny v excelu, příklad výpočtu pro dopravní proud P2:

Výpočet průměrné délky fronty:

$$\bar{x} = \frac{1,81 + 2,08 + \dots + 2,65}{10} = 2,25m \quad (5.5)$$

Výpočet pomocí funkce v excelu:

$$\bar{x} = \text{PRŮMĚR}(1,81:2,64)=2,25$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{(1,81 - 2,25)^2 + \dots + (2,65 - 2,25)^2}{9}} = 0,3m \quad (5.6)$$

Směrodatná odchylka pomocí funkce v excelu:

$$s = \text{SMODCH.VÝBĚR}(1,81:2,64)=0,3$$

Příslušnou hodnotu kvantilu Studentova rozdělení můžeme odečíst ze statistických tabulek, nebo vypočítat pomocí funkce v excelu:

$$t_{1-\alpha/2;n-1} = \text{TINV}(0,05;9)=2,26$$

Výpočet dolní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_d = \bar{x} - \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} = 2,25 - \frac{0,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 2m \quad (5.7)$$

Výpočet horní hranice 95% intervalu spolehlivosti:

$$T_h = \bar{x} + \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot t_{1-\alpha/2;n-1} = 2,25 + \frac{0,3}{\sqrt{10}} \cdot 2,26 = 2,5m \quad (5.8)$$

Tab. 5.5: Výpočet 95-ti% intervalů spolehlivosti pro průměrnou délku fronty a průměrný čas zdržení pro jednotlivé dopravní proudy.

	Délka fronty [m]				Zdržení vozidel čekáním [s]			
Pokus	P2	P4	P6	P8	P2	P4	P6	P8
1	1,81	0,68	2,10	0,71	2,64	2,63	2,59	2,29
2	2,08	0,71	2,40	1,32	3,21	2,41	2,81	3,61
3	1,98	0,72	2,11	0,69	2,81	2,65	2,65	2,20
4	2,05	0,81	2,78	1,05	2,84	2,80	3,50	3,67
5	2,70	0,69	2,17	1,08	3,71	2,85	2,65	3,08
6	2,26	0,89	2,28	0,87	3,21	3,02	2,84	2,83
7	2,43	0,71	2,09	0,92	3,29	2,87	2,72	2,92
8	2,60	0,71	2,44	1,47	3,66	2,66	3,03	4,09
9	1,92	0,70	2,20	1,14	2,59	2,32	2,76	4,09
10	2,65	0,82	2,20	1,44	3,41	2,92	2,66	4,02
\bar{x}	2,25	0,74	2,28	1,07	0,05	0,05	0,05	0,05
s	0,3	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
$t_{1-\alpha/2;n-1}$	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26
T_d	2,0	0,7	2,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
T_h	2,5	0,8	2,4	1,3	0,1	0,0	0,1	0,1

Dále byly porovnány průměrné délky fronty získané simulací a průměrné délky fronty vypočtené dle metodik TP 135. Dále byly porovnávány doby čekání vozidel ve frontě získané simulací a doby čekání vozidel ve frontě vypočtené dle TP 135. Hodnoty získané simulací a výpočtem dle TP135 jsou uvedeny v tab. 5.6.

Tab. 5.6: Porovnání výsledků simulace a výpočtů dle TP135

simulace		výpočet		odchylka	
t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [%]	L_{front} [%]
3,14	2,25	2,98	2,12	4,98	5,84
2,71	0,74	2,78	0,78	-2,29	-4,36
2,82	2,28	2,86	2,32	-1,49	-1,69
3,28	1,07	3,12	1,01	4,82	5,63

Porovnáním výsledku dosažených simulací a výsledků vypočtených pomocí metodik pro výpočet okružních křižovatek poukazuje na poměrně dobrou shodu.

Porovnání výsledků simulace s použitím Erlangova rozdělení pravděpodobnosti se zvyšujícím se parametrem k s výsledky dle metodik pro výpočet okružních křižovatek TP 135.

Porovnání pro k=3

Tab. 5.7: Porovnání výsledků simulace s Erlangovým rozdělením s k=3 a výpočtů dle TP135

simulace		výpočet		odchylka	
t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [%]	L_{front} [%]
1,25	0,90	2,98	2,12	-57,77	-57,50
1,55	0,45	2,78	0,78	-44,02	-41,87
0,81	0,66	2,86	2,32	-71,39	-71,67
1,64	0,54	3,12	1,01	-47,22	-46,29

Z tab. 5.7 je patrné, že při použití Erlangova rozdělení pravděpodobnosti s parametrem $k = 3$ dojde k výrazné odchylce simulačních výsledků od výsledků získaných výpočtem dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek TP 135. Průměrné délky fronty a průměrný čas strávený čekáním je u simulačních výsledků výrazně nižší, než u výsledku vypočtených dle metodik pro výpočet okružních křižovatek TP 135.

Porovnání pro k=6

Tab. 5.8: Porovnání výsledků simulace s Erlangovým rozdělením s k=6 a výpočtů dle TP135

simulace		výpočet		odchylka	
t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [%]	L_{front} [%]
0,73	0,52	2,98	2,12	-75,39	-75,38
1,30	0,37	2,78	0,78	-53,11	-52,61
0,46	0,38	2,86	2,32	-83,69	-83,77
1,17	0,38	3,12	1,01	-62,31	-62,14

Z tab. 5.8 je patrné, že při použití Erlangova rozdělení pravděpodobnosti s parametrem $k = 6$ dojde ještě k výraznější odchylce simulačních výsledků od výsledků získaných výpočtem dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek TP 135, než v minulém případě při parametru $k = 3$. Průměrné délky fronty a průměrný čas strávený čekáním je u simulačních výsledků výrazně nižší, než u výsledku vypočtených dle metodik pro výpočet okružních křižovatek TP 135.

Porovnání pro $k=9$

Tab. 5.9: Porovnání výsledků simulace s Erlangovým rozdělením s $k=9$ a výpočtů dle TP135

simulace		výpočet		odchylka	
t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [s]	L_{front} [m]	t_w [%]	L_{front} [%]
0,65	0,46	2,98	2,12	-78,10	-78,10
1,23	0,35	2,78	0,78	-55,63	-55,31
0,43	0,35	2,86	2,32	-84,83	-84,82
1,21	0,40	3,12	1,01	-60,98	-60,78

Z tab. 5.9 je patrné, že při použití Erlangova rozdělení pravděpodobnosti s parametrem $k = 9$ dojde již k nepatrnému prohloubení odchylek simulačních výsledků od výsledků získaných výpočtem dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek TP 135, než v minulém případě při parametru $k = 6$.

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vytvoření simulačního modelu okružní křižovatky v simulačním software Witness a pomocí experimentů s modelem zkoumat vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a na průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním. Tyto cíle byly v diplomové práci splněny.

Popsané úkony v kapitole teoretická východiska pro řešení práce byly následně využity jako teoretický základ pro další řešení práce. Popsaná teoretická východiska byla využita především při analýze vstupních údajů pro potřeby simulace a následně také při vyhodnocení experimentů provedených na simulačním modelu okružní křižovatky v software Witness.

Kapitola analýza vstupních údajů pro potřeby simulace se zabývá především získáním potřebných dat o konkrétní okružní křižovatce a jejich analýzou. V této kapitole je popsána konkrétní okružní křižovatka, dále je v této kapitole proveden dopravní průzkum na konkrétní křižovatce. Vyhodnocením dopravního průzkumu byly získány parametry vstupních toků vozidel pro tvorbu simulačního modelu a intenzity vozidel do křižovatky vstupujících, vystupujících a pohybujících se v křižovatce. Tyto intenzity byly následně použity pro validaci simulačního modelu v kapitole 4 tvorba simulačního modelu.

Tvorba simulačního modelu okružní křižovatky v software Witness proběhla za použití základních součástí používaných v tomto systému. Pomocí software Witness se v této diplomové práci podařilo vytvořit model okružní křižovatky a provést jeho validaci. Po sérii simulačních běhů na sestaveném modelu byl model prohlášen za validní a bylo tedy možné postoupit k experimentování s daným modelem.

Cílem experimentování s modelem bylo pozorovat vliv charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a na průměrné zdržení vozidel čekáním ve frontě. Při experimentech bylo exponenciální rozdělení časových mezer mezi příchody vozidel do systému nahrazeno Erlangovým rozdělením a byly pozorovány změny průměrné délky fronty čekajících vozidel a průměrný čas strávený čekáním při různých parametrech k Erlangova rozdělení. Byl pozorován značný vliv charakteru vstupního toku na průměrnou délku fronty

čekajících vozidel a na průměrný čas strávený čekáním ve frontě. Průměrná délka fronty čekajících vozidel a průměrný čas strávený vozidly čekáním se při vzrůstajícím parametru k Erlangova rozdělení výrazně snižovaly.

Poslední experiment byl navržen pro porovnání výsledku ze simulace s výsledky získanými výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek. Při experimentu byla sledována průměrná délka fronty čekajících vozidel a průměrný čas strávený vozidly čekáním. Parametry vstupního toku byly zjištěny dopravním průzkumem, na základě kterého byl také proveden kapacitní výpočet dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek. Bylo možné pozorovat poměrně dobrou shodu výsledku získaných simulací a výpočty dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek. Při změně parametrů vstupního toku se výsledky simulace a výpočtu dle metodik pro výpočet kapacit okružních křižovatek značně rozcházely.

V závěru této diplomové práce lze konstatovat, že bylo dosaženo stanoveného cíle. Byl vytvořen model okružní křižovatky v software Witness. Na vytvořeném modelu byly provedeny experimenty zaměřené na zkoumání vlivu charakteru vstupního toku vozidel na průměrnou délku fronty čekajících vozidel a průměrnou dobu zdržení vozidel čekáním ve frontě a experimenty zaměřené na porovnání výsledků dosažených simulací a výsledku vypočtených dle metodik pro kapacitní výpočet okružní křižovatky.

Seznam použité literatury

- [1] TP 135 PROJEKTOVÁNÍ OKRUŽNÍCH KŘIŽOVATEK NA SILNICÍCH A MÍSTNÍCH KOMUNIKACÍCH, V-rojekt s.r.o. Ostrava, září 2005
- [2] TP 189 STANOVENÍ INTENZIT DOPRAVY NA POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH, EDIP s.r.o., 2007
- [3] KŘIVÝ, I; KINDLER, E. Simulace a modelování. Elektronická skripta Ostravské Univerzity, 2001
- [4] ČSN 73 6102 Projektování okružních křižovatek na pozemních komunikacích. 2007
- [5] Google Maps [on line] Dostupné z: <http://maps.google.cz/maps?ct=reset>
- [6] Andres, J. Metodický pokyn Velké okružní křižovatky. Brno: CDV Brno, 2005,ISBN 80-86502-15-5
- [7] Šusta, M., Modelování a simulace [on line] [cit. 2009-02-10]. Dostupné z: http://www.proverbs.cz/media/art/Modelovani_a_simulace.pdf
- [8] Dorda, M. Odhady parametrů základního souboru [on line]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_6.pdf
- [9] Otipka, P; Šmastrla, V. Pravděpodobnost a statistika [on line]. Dostupné z: <http://www.zboriljosef.cz/files/Pravdepodobnost%20a%20statistika.pdf>
- [10] Dorda, M. Vliv vstupního toku vozidel při návrhu signálního plánu světelně řízené křižovatky – simulační studie [on line]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/21_2011/Dorda.pdf
- [11] Bartoš, L. AKTUALIZACE VÝPOČTOVÝCH MODELŮ PRO STANOVENÍ KAPACITY OKRUŽNÍCH KŘIŽOVATEK. Liberec, Edip 2009
- [12] WITNESS Úvod do použití [on line]. Dostupné z: <http://www2.humusoft.cz/witness/doc/>

Seznam příloh

Příloha A Průzkum intenzit v jednotlivých dopravních proudech a přepočet na jednotková vozidla 71

Příloha B Dopravní průzkum minutových intenzit na vstupech zvolené okružní křižovatky 75

Příloha C Výpočet parametru λ pro jednotlivé vstupní proudy 76

Příloha D Tabelární řešení Pearsnova testu dobré shody pro jednotlivé vstupní proudy 78

Příloha E Dopravní průzkum doby průjezdu křižovatkou 80

Příloha A Průzkum intenzit v jednotlivých dopravních proudech a přepoččet na jednotková vozidla

		Proud: P1		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:22 do 15:22		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		392	1	392
autobusy/trolejbusy	sólo	27	2	54
	kloubové	4	3	12
jízdní soupravy		5	3	15
nákladní automobily		10	2	20
Kontrolní součet		438		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				493

		Proud: P2		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:22 do 15:22		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		331	1	331
autobusy/trolejbusy	sólo	25	2	50
	kloubové	6	3	18
jízdní soupravy		3	3	9
nákladní automobily		9	2	18
Kontrolní součet		374		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				426

		Proud: P3		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:22 do 15:22		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		197	1	197
autobusy/trolejbusy	sólo	8	2	16
	kloubové	3	3	9
jízdní soupravy		0	3	0
nákladní automobily		3	2	6
Kontrolní součet		211		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				228

		Proud: P4	
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:22 do 15:22	
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient
osobní automobily		139	1
autobusy/trolejbusy	sólo	7	2
	kloubové	2	3
jízdní soupravy		1	3
nákladní automobily		3	2
Kontrolní součet		152	
Intenzita sledovaného dopravního proudu			168

		Proud: P5	
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29	
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient
osobní automobily		298	1
autobusy/trolejbusy	sólo	18	2
	kloubové	3	3
jízdní soupravy		3	3
nákladní automobily		13	2
Kontrolní součet		335	
Intenzita sledovaného dopravního proudu			378

		Proud: P6	
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29	
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient
osobní automobily		408	1
autobusy/trolejbusy	sólo	17	2
	kloubové	2	3
jízdní soupravy		5	3
nákladní automobily		11	2
Kontrolní součet		443	
Intenzita sledovaného dopravního proudu			485

		Proud: P7		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		139	1	139
autobusy/trolejbusy	sólo	10	2	20
	kloubové	1	3	3
jízdní soupravy		2	3	6
nákladní automobily		3	2	6
Kontrolní součet		155		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				174

		Proud: P8		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		170	1	170
autobusy/trolejbusy	sólo	7	2	14
	kloubové	2	3	6
jízdní soupravy		0	3	0
nákladní automobily		2	2	4
Kontrolní součet		181		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				194

		Proud: Q1		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		158	1	158
autobusy/trolejbusy	sólo	5	2	10
	kloubové	0	3	0
jízdní soupravy		0	3	0
nákladní automobily		3	2	6
Kontrolní součet		166		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				174

		Proud: Q2		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		279	1	279
autobusy/trolejbusy	sólo	14	2	28
	kloubové	1	3	3
jízdní soupravy		2	3	6
nákladní automobily		13	2	26
Kontrolní součet		309		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				342

		Proud: Q3		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		124	1	124
autobusy/trolejbusy	sólo	5	2	10
	kloubové	0	3	0
jízdní soupravy		0	3	0
nákladní automobily		1	2	2
Kontrolní součet		130		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				136

		Proud: Q4		
Sčítáno dne: 26.10.2010		Čas sčítání: od 14:29 do 15:29		
Kategorie vozidel		naměřených vozidel	přepočtový koeficient	jednotkových vozidel
osobní automobily		339	1	339
autobusy/trolejbusy	sólo	12	2	24
	kloubové	3	3	9
jízdní soupravy		3	3	9
nákladní automobily		12	2	24
Kontrolní součet		369		
Intenzita sledovaného dopravního proudu				405

Příloha B Dopravní průzkum minutových intenzit na vstupech zvolené okružní křižovatky

minuta	P2	P4	P6	P8
1	12	2	10	3
2	7	3	12	1
3	5	2	15	2
4	4	6	12	4
5	6	1	9	6
6	13	1	7	4
7	9	2	6	7
8	10	3	8	4
9	5	3	7	6
10	7	1	5	4
11	6	2	9	4
12	4	2	10	3
13	11	4	5	5
14	11	2	6	4
15	5	1	3	2
16	7	2	10	4
17	10	1	8	3
18	5	5	11	4
19	3	5	6	1
20	10	3	7	1
21	7	5	8	3
22	5	2	12	2
23	6	2	11	4
24	5	3	6	2
25	7	1	9	1
26	4	0	7	1
27	8	1	5	5
28	10	5	8	4
29	7	5	7	3
30	4	0	7	2
31	6	4	6	1
32	8	2	9	3
33	5	2	11	6
34	9	4	7	3
35	4	3	12	3
36	7	2	10	5
37	6	4	5	4
38	2	4	4	2
39	11	3	8	2
40	11	0	11	5
41	5	2	14	3
42	4	3	6	1
43	9	0	5	6
44	6	5	9	3
45	7	2	7	4
46	10	4	9	2
47	9	5	3	5
48	13	2	6	1
49	8	2	8	3
50	6	2	13	1
51	7	3	4	1
52	6	4	9	3
53	3	4	6	6
54	9	9	8	2
55	10	2	7	3
56	5	2	14	1
57	7	4	8	4
58	5	5	7	2
59	6	3	5	5
60	9	2	8	5
součet	426	168	485	194

Příloha C Výpočet parametru λ pro jednotlivé vstupní proudy

Výpočet parametru λ pro vstupní proud P2	v_i	n_i	$n_i \cdot v_i$
	2	1	2
	3	2	6
	4	6	24
	5	10	50
	6	9	54
	7	10	70
	8	3	24
	9	6	54
	10	6	60
	11	4	44
	12	1	12
	13	2	26
	Součet		426
	Výběrový průměr		7,10

Výpočet parametru λ pro vstupní proud P4	v_i	n_i	$n_i \cdot v_i$
	0	4	0
	1	7	7
	2	20	40
	3	10	30
	4	9	36
	5	8	40
	6	1	6
	7	0	0
	8	0	0
	9	1	9
	Součet		168
	Výběrový průměr		2,80

Výpočet parametru λ pro vstupní proud P6	v_i	n_i	$n_i \cdot v_i$
	3	2	6
	4	2	8
	5	6	30
	6	8	48
	7	10	70
	8	9	72
	9	7	63
	10	4	40
	11	4	44
	12	4	48
	13	1	13
	14	2	28
	15	1	15
	Součet		485
	Výběrový průměr		8,08

Výpočet parametru λ pro vstupní proud P8	v_i	n_i	$n_i \cdot v_i$
	1	11	11
	2	10	20
	3	13	39
	4	13	52
	5	7	35
	6	5	30
	7	1	7
	Součet		194
	Výběrový průměr		3,23

Příloha D Tabelární řešení Pearsnova testu dobré shody pro jednotlivé vstupní proudy

Dopravní proud P2	třídy	i	m_i	P_i	$n \cdot P_i$	$n \cdot P_i$	$m_i - n \cdot P_i$	$(m_i - n \cdot P_i)^2$	$(m_i - n \cdot P_i)^2 / n \cdot P_i$
	1	2 a méně	1	0,027	1,649	9,844	-0,844	0,712	0,072
	2	3	2	0,049	2,953				
	3	4	6	0,087	5,242				
	4	5	10	0,124	7,443	7,443	2,557	6,536	0,878
	5	6	9	0,147	8,808	8,808	0,192	0,037	0,004
	6	7	10	0,149	8,934	8,934	1,066	1,137	0,127
	7	8	3	0,132	7,929	7,929	-4,929	24,293	3,064
	8	9	6	0,104	6,255	6,255	-0,255	0,065	0,010
	9	10	6	0,074	4,441	10,787	2,213	4,896	0,454
	10	11	4	0,048	2,866				
	11	12	1	0,028	1,696				
	12	13 a více	2	0,030	1,784				
	kontrolní součet		60	1,000	60,000	60,000		X_{obs}	4,610
								X_{krit}	11,070
								$X_{obs} < X_{krit}$	

Dopravní proud P4	třídy	i	m_i	P_i	$n \cdot P_i$	$n \cdot P_i$	$m_i - n \cdot P_i$	$(m_i - n \cdot P_i)^2$	$(m_i - n \cdot P_i)^2 / n \cdot P_i$
	1	0	4	0,061	3,649	13,865	-2,865	8,206	0,592
	2	1	7	0,170	10,216				
	3	2	20	0,238	14,303	14,303	5,697	32,461	2,270
	4	3	10	0,222	13,349	13,349	-3,349	11,216	0,840
	5	4	9	0,156	9,344	9,344	-0,344	0,119	0,013
	6	5	8	0,087	5,233	9,139	0,861	0,741	0,081
	7	6	1	0,041	2,442				
	8	7	0	0,016	0,977				
	9	8	0	0,006	0,342				
	10	9 a více	1	0,002	0,146				
	kontrolní součet		60	1	60			X_{obs}	3,795
								X_{krit}	7,815
								$X_{obs} < X_{krit}$	

Dopravní proud P6	třídy	i	m _i	P _i	n*P _i	n*P _i	m _i -n*P _i	(m _i -n*P _i) ²	(m _i -n*P _i) ² /n*P _i
	1	3 a méně	2	0,040	2,403	5,698	-1,698	2,882	0,506
	2	4	2	0,055	3,294				
	3	5	6	0,089	5,326	5,326	-0,326	0,106	0,020
	4	6	8	0,120	7,175	7,175	0,825	0,681	0,095
	5	7	10	0,138	8,285	8,285	1,715	2,940	0,355
	6	8	9	0,140	8,372	8,372	0,628	0,395	0,047
	7	9	7	0,125	7,519	7,519	-0,519	0,269	0,036
	8	10	4	0,101	6,078	6,078	-2,078	4,317	0,710
	9	11	4	0,074	4,466	11,548	0,452	0,204	0,018
	10	12	4	0,050	3,009				
	11	13	1	0,031	1,871				
	12	14	2	0,018	1,080				
	13	15 a více	1	0,019	1,123				
		kontrolní součet	60	1	60			X _{obs}	1,786
							X _{krit}	12,592	
							X _{obs} <X _{krit}		

Dopravní proud P8	třídy	i	m _i	P _i	n*P _i	n*P _i	m _i -n*P _i	(m _i -n*P _i) ²	(m _i -n*P _i) ² /n*P _i
	1	1 a méně	11	0,167	10,014	10,014	0,986	0,972	0,097
	2	2	10	0,206	12,365	12,365	-2,365	5,594	0,452
	3	3	13	0,222	13,327	13,327	-0,327	0,107	0,008
	4	4	13	0,180	10,773	10,773	2,227	4,961	0,461
	5	5	7	0,116	6,966	6,966	0,034	0,001	0,000
	6	6	5	0,063	3,754	6,555	-0,555	0,308	0,047
	7	7 a více	1	0,047	2,801				
		kontrolní součet	60	1,000	60,000			X _{obs}	1,065
							X _{krit}	9,488	
							X _{obs} <X _{krit}		

Příloha E Dopravní průzkum doby průjezdu křižovatkou

vozidlo	čas v křižovatce [s]
1	9,1
2	7,2
3	3,7
4	10,6
5	7,8
6	8
7	7,5
8	13,1
9	7,4
10	4,1
11	3,3
12	7
13	3,9
14	9,8
15	7,8
16	8,1
17	12,3
18	4,1
19	3,8
20	7,7
21	15
22	3,1
23	8,7
24	10,1
25	7,1
26	11,2
27	4,5
28	7,9
29	8,1
30	7,3
Σ	229,3
Σ/30	7,643333